وثوقية منظومات القدرة الكهربائية

Electrical Power Systems Reliabilty

تأليف : أ.د. محمد توفيق الزهيري

- وثوقية أنظمة التوليد
- وثوقية أنظمة النقل
- وثوقية أنظمة التوزيع

الإصدار الألكتروني الأول

بسم الله الرحمن الرحيم

[سُبْحَانَكَ لا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ]

وثوقية منظومات القدرة الكهربائية

تأليف

الأستاذ الدكتور محمد توفيق لازم الزهيري
أستاذ الهندسة الكهربائية والألكترونية

Dr.Mohammed Tawfeeq Lazim Alzuhairi
Professor of Electrical and Electronics Engineering

أب (اغسطس) 2026

المحتويات

الفصل الأول
مقدمة في وثوقية منظومات القدرة الكهربائية

1-1مقدمة 1
1-2 نظرية الوثوقية 1
1-3 نبذة تأريخية 3
1 -4. أساسيات تقييم الوثوقية...4
1-5 متطلبات الوثوقية..5
1-6 ثقافة الوثوقية / الأخطاء البشرية / العوامل البشرية.......................... 6
1-7 التصميم من أجل الوثوقية 7
1-8 معايير وثوقية النظام الكمية – النظرية 8
1-9 اختبار الوثوقية 9
1-9-1 متطلبات اختبار الوثوقية.. 11
1-9-2 طريقة الاختبار..12
1-10 الوثوقية الإنشائية 13
1-11 مقارنة بهندسة السلامة 13
1-12 تقييم الوثوقية التشغيلية 14
1-13 وثوقية منظومات القدرة الكهربائية... 14
1-14 تقييم وثوقية أنظمة القدرة الكهربائية.. 16
1-14-1 تقييم وثوقية نظام التوليد.. 17
1-14-2 تقييم وثوقية نظام النقل 18
1-14-3 تقييم وثوقية نظام التوزيع 19
1-15 تنظيم فصول الكتاب... 20

الفصل الثاني
أساسيات علم الإحصاء ونظرية الاحتمالات

2-1 مقدمة..23
2-2 مفهوم التكرار...23
2-2-1 مفهوم الفئة 25
2-2-2 الرسوم البيانية للتكرار 25
2-2-3 نموذج التوزيع التكراري التراكمي.. 25
2-3 المعايير المهمة لتوزيع التردد 26
2-3-1 المتوسط الحسابي.. 26
2-3-2 الوسيط.. 26
2-3-3 المنوال.. 26
2-3-4 الانحراف المعياري 26
2-3-5 التباين..29
2-4 المفاهيم الأساسية لنظرية المجموعات..30
2-4-1 المجموعات والعناصر 30
2-4-2 المجموعات الجزئية 31

3-4-2 العمليات على المجموعات: الاتحاد، التقاطع 32
4-4-2 عمليات إضافية على المجموعات: الفرق، والمتمم..................... 34
5-4-2 معادلات نظرية المجموعات 34
5-2 نظرية الاحتمالات 36
1-5-2 التعريفات.. 36
2 -5-2ملاحظات حول نظرية الاحتمالات الأساسية.............................. 38
3-5-2 قاعدة الضرب في الاحتمالات 39
6-2 مخططات فين 40

الفصل الثالث
التوزيعات في علم الإحصاء

1-3 مقدمة.. 45
2-3 أنواع التوزيعات المبنية على نظرية الإحتمالات 45
1-3-3 المتغير العشوائي.. 47
2-3-3 دالة كثافة الاحتمال 50
3-3-3 معلمات التوزيعات الاحتمالية... 51
4-3 التوزيع ذو الحدين 51
5-3 التباديل والتوافيق 56
6-3 تطبيقات التوزيع ذو الحدين 61
7-3 توزيع بواسون الإحتمالي 66
8-3 التوزيع ألأسي 68
9-3 التوزيع الطبيعي 70
10-3 أنواع الأخطاء 73
1-10-3 معدل الخطأ 75
2-10-3 جودة اختبار الفرضية 76
3-10-3 التحكم في الأخطاء 79
11-3 الإستنتاجات 79

الفصل الرابع
مبادئ الوثوقية

1-4 مقدمة.. 80
2-4 معدل الفشل 80
1-2-4 المفهوم والنموذج... 80
2-2-4 مفهوم منحنى حياة المكونات 82
3-4 نموذج الوثوقية 84
4-4 متوسط الزمن بين الأعطال 88
5-4 وثوقية الأنظمة المعقدة 90
1-5-4 الأنظمة المرتبطة على التوالي (المتسلسلة)................................... 90
2-5-4 الأنظمة المرتبطة على التوازي (المتوازية)................................... 91
3-5-4 وثوقية الأنظمة المتصلة على التوالي والتوازي 95
6-4 نموذج التوافرية 96
7-4 متوسط وقت الإصلاح.. 97
8-4 تقييم وثوقية الشبكات باستخدام نظرية المجموعات 97

4-9 التكرارية (المكونات الإحتياطية الإضافية) 101
4-9-1 أنواع التكرارية 102
4-9-2 عيوب التكرارية 104
4-9-3 التكرار والتوافر العالي 104
4-10 الأنظمة ذات التكرار الجزئي 105
4-11 نظرية باي 106
4-12 نمذجة نظام الاستعداد: المصطلحات والتعريفات الهامة.............. 109
4-12-1 قطع غيار لوحدات متعددة قابلة للتبديل............................... 111
4-12-2 نموذج ماركوف 113

الفصل الخامس

تقييم وثوقية الأنظمة الكهربائية بطريقتي مخطط شجرة الأعطال وشجرة الأحداث

5-1مقدمة 115
5-2 تحليل شجرة الأعطال.. 115
5-3 منهجية التحليل النوعي لشجرة الأعطال 115
5-3-1 خصائص شجرة الأعطال.. 117
5-3-2 القواعد الأساسية لدمج احتمالية أحداث فشل المدخلات............... 120
5-4 تحليل شجرة الأحداث لتقييم وثوقية الأنظمة الكهربائية..................... 132
5-4-1 النظرية والمنهجية... 133
5-4-2 خطوات إجراء تحليل شجرة الأحداث 135
5-4-3 تطبيق طريقة شجرة الأحداث على الشبكات الكهربائية 135
5-5 تطبيق نظرية الاحتمال الشرطي على تكوينات تشغيل النظام 139
5-6 الأحداث الشرطية المتنافية.. 141

الفصل السادس

تقييم وثوقية التوليد

6-1 مقدمة.. 146
6-2 طرق تقييم وثوقية نظام التوليد... 147
6-3 أنواع الإنقطاعات الأنظمة الكهربائية ونقص امداد الطاقة 148
6-4 تعاريف في تقييم وثوقية أنظمة التوليد.. 149
6-4-1 تقييم القدرة الثابتة وتقييم القدرة التشغيلية.............................. 151
6-4-2 التوافرية (AV) ومعدل الانقطاع القسري (FOR) 153
6-4-3 جداول احتمالية انقطاع السعة 153
6-4-4 نموذج الحمل 157
6-5 طرق تقييم وثوقية نظام التوليد... 161
6-5-1 الطريقة الاحتمالية : طريقة احتمالية فقدان الحمل..................... 161
6-5-2 الطريقة الحتمية (غير الإحتمالية) 165
6-6 مؤشرات فقدان الحمل 169
6-6-1 المفاهيم وتقنيات التقييم... 169
6-4-2 امثلة عددية.. 172
6-7 دراسات الحساسية 175

الفصل السابع

تقييم وثوقية نظام التوليد : مؤشرات فقدان الطاقة

7-1 مقدمة 179
7-2 تقييم مؤشرات الطاقة 179
7-2-1 الطاقة المتوقعة غير المُزوَّدة 179
7-2-2 المنهجية الثانية في احتساب مؤشر الطاقة غير المُجهزة المتوقعة .. 182
7-3 مؤشر وثوقية الطاقة 183
7-4 طريقة تقييم الطاقة المتوقعة المُجهزة 184
7-5 تحليل توسيع القدرة التوليدية 189
7-5-1 أساليب التقييم 189
7-5-2 تأثيرات الاضطراب 192
7-6 إدراج الصيانة 195
7-7 عدم اليقين في توقعات الأحمال 199
7-8 طريقة المدة والتردد 202
7-9 نموذج التوليد - التطوير الأساسي 203

الفصل الثامن

تقييم وثوقية المنظومات المترابطة

8-1 مقدمة 209
8-2 نماذج المكونات 210
8-2-1 نماذج وحدات التوليد 210
8-2-2 خطوط النقل 211
8-2-3 المحولات وقضبان التوزيع 212
8-2-4 قواطع الدائرة 2 12
8-2-5 أعطال الوضع المشترك 212
8-3 طرق تحليلية لتقييم وثوقية الأنظمة المركبة 213
8-3-1 أساليب حل الشبكة 215
8-3-1-1 نموذج تدفق الشبكة الخطية 215
8-3-1-2 نموذج تدفق الشبكة الخطية 215
8-3-1-3 نموذج تدفق القدرة المتناوبة 217
8-3-2 الإجراءات التصحيحية 217
8-3-3 تصنيف واختيار حالات الطوارئ 218
8-3-3-1 مؤشر الأداء (PI) لانقطاعات المولدات 219
8-3-3-2 اختيار خطة الطوارئ بناءً على انحرافات الفولتية 220
8-3-3-3 تقييم الطوارئ 221
8-4 محاكاة مونت كارلو 221
8-4-1 الفكرة الأساسية لأخذ العينات العشوائية 221
8-4-2 خوارزمية أخذ العينات 222
8-4-2-1 اختيار حالة النظام (الخطوة 2 في الخوارزمية) 223
8-4-2-2 التقارب (الخطوة 5) 224
8-4-3 تقليل التباين لتحسين الكفاءة الحسابية 224

8-4-4 المحاكاة التسلسلية 226
8-5 الاعتبارات السيبرانية الفيزيائية 228
8-6 دمج طاقة الرياح 228
8-6-1 العلاقة بين الحمل وإنتاج طاقة الرياح 229

8-6-2 **تأثير الدوامة** 229
8-6-3 دمج أنظمة التخزين 229
8-7 الإستنتاجات.. 230

الفصل التاسع
تقييم وثوقية نظام النقل

9-1 مقدمة 231
9-2 معايير التحليل.. 232
9-3 معلمات المكونات ومؤشرات النظام 232
9-4 تقنية فضاء الحالة (نمذجة ماركوف) 232
9-4-1 التوافرية وعدم التوافرية 233
8-4-2 تطبيقات على أنظمة النقل 234
9-5 تقييم وثوقية نظام خط نقل واحد باستخدام طريقة ماركوف مع مراعاة حالتين جويتين 239
9-5-1 حالات الطقس 239
9-5-2 تقييم وثوقية خطي نقل طاقة باستخدام طريقة ماركوف مع مراعاة حالتين جويتين 242
9-6 طريقة ألتردد (التكرار) والمدة (الطريقة التقريبية) 246
9-7 الطرق التقريبية.. 249
9-7-1 المكونات المربوطة في توالٍ 249
9-7-2 المكونات المربوطة في توازٍ 250
9-7-3 تقنية اختزال الشبكة لتحليل أنماط الفشل 253
9-8 وثوقية الشبكة مع إجراءات التبديل.. 259
9-9 تكاليف نظام الطاقة 264

الفصل العاشر
تحليل وثوقية أنظمة التوزيع

10- 1 مقدمة.. 267
10-2 نظام توزيع القدرة الكهربائية.. 268
10 -3 أهمية تقييم وثوقية نظام التوزيع 272
10-4 معايير تخطيط وتصميم شبكات التوزيع الحالية.. 274
10-4-1 جمع بيانات انقطاع التيار الكهربائي والإبلاغ عنها.. 274
10-4-2 العوامل المؤثرة في التقييم.. 274
10-4-3 فوائد تقييم وثوقية شبكات التوزيع.. 274
10-5.. 275
10-5-1 تقييم نظام التوزيع الشعاعي.. 275
10-5-2 مؤشرات الوثوقية المستخدمة في الطرق الحتمية 276
10-5-3 مؤشرات الوثوقية القائمة على المستهلكين 277
10-5-4 مؤشرات الحمل والطاقة.. 282
10-5-5 التنبؤ بالنظام 284
10-5 تقييم وثوقية المحطات الثانوية المعزولة بالهواء 285
10-6-1 قضبان التوزيع 286
10-6-2 قضيب توزيع مفرد 287
10-7 تقييم وثوقية أنظمة التوزيع المختلفة.. 289

10-7-1 تقييم وثوقية أنظمة التوزيع المختلفة 289
10-7-2 أنظمة القضبان المزدوجة والقواطع المزدوجة 291
10-7-3 نظام قضيب التوزيع المزدوج مع قاطع الدائرة ونصف الدائرة 292
10-7-4 الحل العام لنظام الربط الحلقي الذي يحوي عدد n من المغذيات 293
10-7-5 التطبيقات العملية لمعادلة النظام الحلقي العامة............................ 298
10-7-6 نظام توزيع القضبان الثلاثية (الأنظمة الشبكية) 300

الفصل الأحد عشر

تقييم وثوقية محطات التوزيع الثانوية المترابطة

11-1 مقدمة 305
11- 2 ثقييم وثوقية محطتين ثانويتين مرتبطتين مع بعضهما............ 306
11-3 طرق تعداد الحالات 308
11-4 أساليب اختزال الشبكة 309
11-5 طرق تعداد المسارات: مجموعة الربط الصغرى 309
11-6 طرق تعداد المسارات: مجموعة القطع الصغرى........................... 318
11-7 تصميم أنظمة الطاقة الصناعية والتجارية لضمان الوثوقية................ 330
11-7-1 مثال 1 :نظام توزيع شعاعي بسيط 331
11-7-2 **مثال 2:** تحليل وثوقية نظام الانتقاء الأولي لإمداد الطاقة
الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت.. 334
11-7-3 **مثال 3:** نظام انتقائي أولي لجانب الحمل لقاطع دائرة كهربائية
بفولتية 11 كيلوفولت.. 338

الفصل الإثنا عشر

تقييم وثوقية منظومات الطاقة المتجددة

12-1مقدمة 341
12-2 الوثوقية، و التوفرية (الجاهزية)، والقابلية للصيانة 342
12-3 لماذا تختلف وثوقية الطاقة المتجددة...344
12-4 التسلسل الهرمي لدراسة الوثوقية... 345
12-4-1 محطة طاقة شمسية كهروضوئية 345
12-4-2 محطة طاقة الرياح... 347
12-5 وثوقية توربينات الرياح 349
12-6 معدل الفشل لوحدات التوليد القائمة على الطاقة المتجددة.................... 350
12-6-1 معدل الفشل في النظام الكهروضوئي 351
12-6-2 معدل فشل توربينات الرياح.. ... 354
12-7 بيانات الأعطال - - أساس الدراسة 356
12-8 تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها (FMEA) 356
12-9 تحليل شجرة الأعطال.. 357
12-10 مخطط كتل الوثوقية (RBD) 358
12-11 نمذجة ماركوف... 358
12-12 محاكان مونت كارلو... 359

12-13 الوثوقية القائمة على الطاقة.. 360
12-14 عامل السعة مقابل الوثوقية 360
12 -15 مقاييس الجاهزية (التوفرية) 360
12-16 وثوقية الشبكة 361
12-17 احتمالية فقدان الطاقة وفقدان الحمل.. 362
12-18 الطاقة المتوقعة غير المُلبّاة 363
12-19 الاعتمادية وفشل الأسباب المشتركة 363
12-20 الوثوقية البيئية 363
12-21 الوثوقية ومعدل التدهور 364
12 -22 الوثوقية مقابل الأداء 364
12-23 نمذجة الصيانة 365
12-24 وقت الإصلاح 365
12-25 هيكلية نموذج الوثوقية 366
12-26 مثال على تقييم بسيط لوثوقية نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية 367

الفصل الثالث عشر

طرق تحسين الوثوقية

13-1 مقدمة... 368
13- 2 تحسين وثوقية نظام توليد الطاقة.. 368
13-3 تحسين وثوقية نظام النقل.. 372
13-4 تحسين وثوقية نظام التوزيع 375
13-5 استهداف الدوائر المحددة... 376
13-6 تحديد أسباب الأعطال ومعالجتها.. 377
13-7 إجراءات الأتمتة... 377
13-8 معدات الحماية والتحويل (معدات الفتح والغلق)............................. 380
13-9 الفحص والصيانة.. 380
13-10 الحد من الأعطال 383
13-11 . تحسين حماية أعطال المكونات في شبكة التوزيع... 383
13-12 نمذجة قواطع الدائرة في تقييم الوثوقية......................................386.
13-13 مفهوم تماسك الموثوقية 387

الملاحق والمراجع 390

مقدمة الإصدار الأول

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله الذي وهب للإنسان نعمة العقل ، وخصه على سائر مخلوقاته بالعلم والعمل ، وفضل أهل العلم ورفعهم درجات وبعد ؛ فإن المكتبة العربية ما تزال فقيرة في كثير من العلوم الحديثة ، خاصة ما تضمنه هذا الكتاب من مادة مهمة وهي وثوقية منظومات القدرة التي تعتبر مادة متقدمة في مجال الهندسة الكهربائية حيث تدرس في الصفوف المنتهية أو المتقدمة في أقسام الهندسة الكهربائية في الجامعات كافة وكذلك تخص المهندسين العاملين في محطات توليد الطاقة الكهربائية وأنظمة شبكات النقل والتوزيع بصورة خاصة. وكذلك الطلبة الجامعيين في الدراسات العليا في اختصاص القوى الكهربائية.

لقد تبلورت فكرة تأليف هذا الكتاب من قبل المؤلف لما لاحظ خلو المكتبات العربية من كتب مترجمة أو مؤلفة هذا الموضوع الذي يعد من المواضيع المعقدة والصعبة نوعاً ما والذي قلما أو لا توجد له مراجع في اللغة العربية "حسب علم المؤلف " لقلة المتخصصين في هذا المجال في الوطن العربي والعالم ولكون أن المؤلف إختص في هذا المجال لأول مرة في العراق وحصل على درجة الماجستيرعام 1975 بدرجة إمتياز لدراسة وثوقية الشبكة الكهربائية العراقية ، وقام بتدرييس هذا الموضوع لسنين طويلة في معظم الجامعات العراقية والعربية ، وكذلك الإشراف على رسائل الماجستير واطروحات الدكتوراه للعديد من طلبة الدراسات العليا وطلبة الصفوف المنتهية للدراسات الأولية. وتجدر الإشارة إلى أنه لم يكن في الميدان من الكتب العربية ما يمكن أن يتقدم على هذا الكتاب بحيث يغني عن النهوض بهذا العبء الجسيم.

سيجد القارئ في هذا الكتاب مادة علمية غزيرة، ومواضيع جديدة ، وارتباطا بين مواد فصوله ، وتآلفاً في محتوياته ولقد كانت صياغة المادة العلمية لهذا الكتاب بحيث يقرب المصطلحات الأجنبية إلى لغة الضاد أمر شاق جدا ؛ خاصة في اختيار الكلمات المناسبة والبسيطة لكي يستطيع القارئ العربي فهمها بسهولة. وقد روعي أيضا أن تعطى المصطلحات المهمة باللغتين العربية والإنجليزية ليسهل على القارئ الكريم فهمها وإدراكها .

يتألف هذا الكتاب من إثنا عشر فصلا وضعت لملائمة حاجة المهندسين الكهربائيين والطلبة الجامعيين في المراحل المتقدمة في دراسة الهندسة الكهربائية. وقد زود كل فصل من هذا الكتاب بمقدمة تعطي تعاريف بمادة الفصل وإظهار للنظرية الأساسية. وقد حرصنا على إعطاء أمثلة محلولة عند الشعور بأنها تضيف وتوضح النص بأسلوب بسيط ومفيد. والسبب في إعطاء

الأمثلة المحلولة هذه هو أن القارئ يميل إلى الرغبة في تطبيق المعرفة ضمن نطاق عمله ويحتاج الى الممارسة العملية لاستكمال المعلومات من أوجه الموضوع المختلفة.

إن المؤلف إذ يرحب بأي انتقاد بناء لهذا الكتاب سوف يكون ممتنا إذا ما تم تزويده بأية ملاحظات أو عن أي خطأ وارد أو تعقيب يسهم في تقويمه لإظهاره بالشكل الأمثل. وفي الوقت نفسه يتقدم المؤلف بالشكر الجزيل إلى المهندس الإستشاري الأستاذ طارق الجميلي مدير الحشد الوطني لإعمار قطاع الكهرباء في العراق سابقاً الذي قام بالقراءة الأولية لفصول الكتاب وإبداء ملاحظاته القيمة .

وأود أن أبين للقارئ الكريم أن ترقيم المعادلات في هذه الكتاب تقرأ من اليسار الى اليمين. أما ترقيم الفقرات والأشكال والجداول وغيرها فتقرأ من اليمين إلى اليسار ، وأود الإشارة اليه كذلك إلى أن الأحرف اللاتينية والمصطلحات الإنكليزية التي تظهر خلال الأسطر تقرأ من اليسار الى اليمين ، آملين أن نكون قد وفقنا في مجهودنا هذا قد ساهمنا في إغناء المكتبة العربية الفتية التي لاشك أن بها حاجة إلى المزيد من الكتب والمراجع لكي يستفيد منها الطلبة والمهندسون ورجال الصناعة .وفق الله الجميع لما هو خير الأمة العربية والبشرية جمعاء وهو تعالى من وراء القصد .

المؤلف

لندن في آب - أغسطس 2026

الفصل 1

مقدمة في وثوقية منظومات القدرة الكهربائية

1-1 مقدمة

الوثوقية بصورة عامة ، مصطلح يعني التحمل والاعتمادية والأداء الجيد. . أما بالنسبة للأنظمة الهندسية، فهي أكثر من مصطلح مجرد؛ إنها شيء يمكن حسابه وقياسه وتقييمه وتخطيطه وتصميمه في قطعة من المعدات أو في نظام معين . تعني الوثوقية قدرة النظام على أداء الوظيفة التي صُمم من أجلها في ظل ظروف التشغيل التي سيواجهها خلال عمره التشغيلي المتوقع. لذا في الأنظمة الهندسية، تُعرَّف وثوقية أي مكون أو نظام بأنها احتمال أن يؤدي هذا المكون أو النظام وظيفته بكفاءة في ظل ظروف محددة ولفترة زمنية معينة.

وتعتمد دراسات الوثوقية بشكل أساسي على نظريات الاحتمالات Probability Theories والإحصاء Statistics ، والتي تستخدم فيها أيضاً نظريات المجموعات Set Theories . لذا، لفهم الوثوقية، لا بد من مراجعة المفاهيم الأساسية للإحصاء والاحتمالات ونظرية المجموعات التي سنأتي عليها لاحقاً في الفصل الثاني القادم.

والوثوقية دراسة ضرورية لتفادي الكوارث التي قد تحدث نتيجة الأخطاء في تصميم الأجهزة والمعدات وخاصة الطائرات والسفن والمركبات وغيرها كما يتضح من الشكلين 1-1 و 1-2 .

2-1 نظرية الوثوقية Reliability theory

كما تم ذكره سلفاً فإن الوثوقية تُعرَّف بأنها احتمال أن يؤدي جهاز ما وظيفته المقصودة خلال فترة زمنية محددة في ظل ظروف معينة. ويمكن التعبير عن ذلك رياضياً كما يلي:

$$R(t) = Pr\{T > t\} = \int_t^{\infty} f(x)\, dx$$

حيث $f(x)$ هي دالة كثافة احتمال الفشل، و t هي طول الفترة الزمنية (التي يُفترض أنها تبدأ من الزمن صفر).

يتضمن هذا التعريف عدة عناصر أساسية:

الشكل 1-1 لا تُقبل العيوب والأعطال الموجودة على ألطائرة باي حال من الأحوال.

الشكل 1-2 قد تتسبب العيوب الناتجة عن سوء التصميم الهندسي في حدوث كوارث.

1- تعتمد الوثوقية على "الوظيفة المقصودة" : ويُفهم هذا عمومًا على أنه الإشتغال بدون فشل. مع ذلك، حتى لو لم يفشل أي جزء من النظام، ولكن النظام ككل لا يؤدي وظيفته كما هو مُخطط له، فإن ذلك يؤثر على وثوقية النظام. وتُعد مواصفات متطلبات النظام المعيار الذي تُقاس على أساسه الوثوقية.

2- ينطبق مفهوم الوثوقية على فترة زمنية محددة. عمليًا، يعني هذا أن النظام لديه فرصة محددة للعمل دون عطل قبل مرور الزمن T. وتضمن هندسة الوثوقية أن المكونات والمواد ستفي بالمتطلبات خلال الفترة الزمنية المحددة. وتجدر الإشارة إلى أنه قد تُستخدم وحدات أخرى غير الزمن أحيانًا (مثل "المهمة" أو "دورات تشغيل").

3. تقتصر الوثوقية على التشغيل في ظل ظروف محددة (أو ظروف مُعرّفة بوضوح). هذا القيد ضروري لأنه من المستحيل تصميم نظام لظروف غير محددة. فمركبة استكشاف المريخ ، مثلاً ، لها ظروف تشغيل محددة تختلف عن سيارة صالون عائلية. لذا يجب مراعاة بيئة التشغيل أثناء التصميم والاختبار. وقد يُطلب من المركبة نفسها العمل في ظروف متغيرة تتطلب مزيدًا من التدقيق.

3-1 تأريخ الوثوقية

من عام 1816 وحتى الحرب العالمية الثانية (1939-1945) ، كان معنى الوثوقية مرتبطاً بالثبات والتكرار وإمكانية الإعتماد على النتائج ؛ إذ كان يُعتبر الاختبار (في أي نوع من العلوم) "موثوقًا" إذا تم الحصول على النتائج نفسها بشكل متكرر. وفي عشرينيات القرن العشرين، روّج الدكتور والتر أ. شيوهارت في مختبرات بيل الأمريكية لصناعة الهواتف لغرض تحسين المنتجات من خلال استخدام التحكم الإحصائي في العمليات، وتزامن تطور هندسة الوثوقية مع تطور الجودة. أما الاستخدام الحديث لكلمة "الوثوقية" فقد عرّفه الجيش الأمريكي في أربعينيات القرن العشرين، ليصف منتجًا يعمل عند توقعه للعمل ولمدة محددة.

خلال الحرب العالمية الثانية، ظهرت العديد من مشكلات الوثوقية عن عدم وثوقية المعدات الإلكترونية المتوفرة آنذاك، وعن مشكلات الإجهاد. ففي عام 1945، نشر العالم م. أ. مينر بحثًا رائدًا بعنوان "التلف التراكمي الناتج عن الإجهاد" في إحدى مجلات الجمعية الأمريكية للمهندسين الميكانيكيين (ASME). وكان أيضاً أحد التطبيقات الرئيسية لهندسة الوثوقية في المجال العسكري هو الصمامات المفرغة من الهواء Vacuum Tubes المستخدمة في أنظمة الرادار وغيرها من الأجهزة الإلكترونية، حيث أثبتت وثوقيتها بكونها بالغة الصعوبة والتكلفة. وقد أنشأ معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) في الولايات المتحدة جمعية الوثوقية في عام 1948. وفي عام 1950، شكلت وزارة الدفاع الأمريكية مجموعة تُسمى "المجموعة الاستشارية المعنية بوثوقية المعدات الإلكترونية" (AGREE) لدراسة أساليب وثوقية المعدات العسكرية حيث أوصت هذه المجموعة بثلاث طرق عمل رئيسية :

- تحسين وثوقية المكونات.
- وضع متطلبات الجودة والوثوقية للموردين.
- جمع البيانات الميدانية وتحديد الأسباب الجذرية للأعطال.

في ستينيات القرن الماضي، ازداد التركيز على اختبارات الوثوقية على مستوى المكونات والمنظومات. ففي ذلك الوقت، تم وضع المعيار العسكري الشهير MIL-STD-781. وفي الفترة نفسها تقريبًا، نشرت شركة RCA الدليل العسكري 217، الذي كان يُستخدم على نطاق واسع للتنبؤ بمعدلات فشل المكونات الإلكترونية. ثم بدأ التركيز على وثوقية المكونات والبحوث التجريبية (مثل MIL-STD-217) بالتراجع تدريجيًا حيث بدأ استخدام مناهج أكثر عملية، كتلك المستخدمة في الصناعات الاستهلاكية. ففي ثمانينيات القرن الماضي، ازداد استخدام أشباه الموصلات الصلبة في أجهزة التلفاز. كما شهدت السيارات زيادة سريعة في استخدامها لأشباه الموصلات Semiconductors، مع دمج مجموعة متنوعة من المعالجات الدقيقة Micro processors تحت غطاء المحرك وفي لوحة القيادة. وطورت أنظمة تكييف الهواء الكبيرة بوحدات تحكم إلكترونية، وكذلك أفران الميكروويف ومجموعة متنوعة من الأجهزة الأخرى. وبدأت أنظمة الاتصالات في اعتماد الإلكترونيات لاستبدال أنظمة التبديل الميكانيكية القديمة. وأصدرت شركة بيلكور أول منهجية للتنبؤ باحتياجات المستهلكين في مجال الاتصالات، وطورت جمعية مهندسي السيارات (SAE) وثيقة مماثلة (SAE870050) لتطبيقات السيارات. وتطورت طبيعة التنبؤات خلال العقد الماضي، واتضح أن تعقيد الرقاقة الألكترونية لم يكن العامل الوحيد الذي يحدد معدلات فشل الدوائر المتكاملة.

4-1 أساسيات تقييم الوثوقية

تُستخدم العديد من التقنيات الهندسية في تقييمات مخاطر الوثوقية، مثل مخططات الوثوقية، وتحليل المخاطر، وتحليل أنماط الفشل وتأثيراتها (FMEA) وتحليل شجرة الأعطال Fault Tree Analysis (FTA)، والصيانة المرتكزة على الوثوقية، وحسابات الأحمال (الاحتمالية) وإجهاد المواد والتآكل، وتحليل الإجهاد والزحف (الاحتمالي)، وتحليل الأخطاء البشرية، وتحليل عيوب التصنيع، واختبارات الوثوقية، وغيرها. وكان يجب إجراء هذه التحليلات بدقة وعناية فائقة بالتفاصيل لضمان فعاليتها. ونظرًا لكثرة تقنيات الوثوقية، وتكلفتها، واختلاف درجات الوثوقية المطلوبة باختلاف الظروف، فإن معظم المشاريع تُعدّ خطة برنامج وثوقية لتحديد مهام الوثوقية لمتطلبات بيان العمل ((Statement of Work (SoW التي سيتم تنفيذها لهذا النظام تحديدًا.

5-1 متطلبات الوثوقية

في أي نظام، تتمثل إحدى أولى مهام هندسة الوثوقية في تحديد متطلبات الوثوقية والصيانة بدقة، انطلاقًا من احتياجات التوافر الإجمالية، والأهم من ذلك، استنادًا إلى تحليل دقيق لأعطال التصميم أو نتائج اختبارات النماذج الأولية ، ينبغي أن تقيّد المتطلبات الواضحة (القابلة للتصميم وفقًا لها) المصممين من تصميم عناصر/ بنى/ واجهات / أنظمة غير موثوقة. ولا يُعدّ الاكتفاء بتحديد أهداف التوافر أو الوثوقية أو قابلية الاختبار أو الصيانة (مثل الحد الأقصى لمعدلات الأعطال) مناسبًا. هذا فهم خاطئ شائع لهندسة متطلبات الوثوقية. وتتناول متطلبات الوثوقية النظام نفسه، بما في ذلك متطلبات الاختبار والتقييم، والمهام والوثائق المرتبطة بها. وتُدرج متطلبات الوثوقية في مواصفات متطلبات النظام أو النظام الفرعي المناسبة، وخطط الاختبار، وبيانات العقد.

يُعدّ وضع متطلبات دقيقة على المستويات الأدنى أمرًا بالغ الأهمية ولا يكفي الاكتفاء بتوفير أهداف كمية دنيا (مثل متوسط الزمن بين الأعطال أو معدلات الفشل Mean time between failures (MTBF)) لأسباب عديدة. أحد هذه الأسباب هو أن التحقق الكامل (المتعلق بالصحة وإمكانية التحقق بمرور الوقت) من تخصيص وثوقية ذات وصف كمي (مواصفات المتطلبات) على المستويات الأدنى للأنظمة المعقدة لا يمكن (في الغالب) تحقيقه نتيجةً لـ (1) كون المتطلبات احتمالية، (2) ارتفاع مستوى عدم اليقين بشكل كبير عند إثبات الامتثال لجميع هذه المتطلبات الاحتمالية، و(3) كون الوثوقية دالة للزمن، ولا تتوفر تقديرات دقيقة لرقم الوثوقية (الاحتمالي) لكل عنصر إلا في مراحل متأخرة جدًا من المشروع، وأحيانًا حتى بعد عدة سنوات عديدة من الاستخدام الفعلي.

علاوة على ذلك، ينبغي أن توجه متطلبات تصميم الوثوقية تصميم النظام (أو الجزء) نحو دمج خصائص تمنع حدوث الأعطال، أو تحد من عواقبها من الأساس. ولا يقتصر دورها على المساعدة في بعض التنبؤات فحسب، بل يمنع هذا الجهد أيضًا تحويل العمل الهندسي إلى مجرد أعمال محاسبية. ويجب أن تكون متطلبات التصميم دقيقة بما يكفي لتمكين المصمم من تصميم النظام وفقًا لها، وإثبات تحقيقها من خلال التحليل أو الاختبار، وإن أمكن، ضمن مستوى ثقة محدد. وينبغي تفصيل أي نوع من متطلبات الوثوقية التي يمكن استخلاصها من تحليل الأعطال (تحليل الإجهاد والتعب باستخدام العناصر المحدودة، تحليل مخاطر الوثوقية، تحليل شجرة الأعطال، تحليل أنماط وتأثيرات الأعطال، تحليل العوامل البشرية، تحليل المخاطر الوظيفية،... إلخ) أو أي نوع من اختبارات الوثوقية. كما يلزم تحديد متطلبات لاختبارات التحقق (مثل إجهادات التحميل الزائد المطلوبة) والوقت اللازم للاختبار. ولاستخلاص هذه المتطلبات بفعالية، ينبغي استخدام منطق تقييم المخاطر وتخفيفها القائم على هندسة النظم.

يجب إنشاء أنظمة سجلات مخاطر قوية تتضمن معلومات تفصيلية حول أسباب وكيفية فشل الأنظمة. تُستخلص المتطلبات وتُتابع بهذه الطريقة. ينبغي أن تُوجّه متطلبات التصميم العملية هذه عملية التصميم، ولا تُستخدم فقط لأغراض التحقق. تُستخلص هذه المتطلبات (التي غالبًا ما تكون قيودًا تصميمية) من تحليل الأعطال أو الاختبارات الأولية. يُعدّ فهم هذا الفرق، مقارنةً بمواصفات المتطلبات الكمية (اللوجستية) البحتة (مثل معدل الفشل أو متوسط الزمن بين الأعطال المستهدف)، أمرًا بالغ الأهمية في تطوير أنظمة معقدة ناجحة .

6-1 ثقافة الوثوقية / الأخطاء البشرية / العوامل البشرية

في الواقع، يمكن إرجاع معظم حالات الفشل إلى نوع من الأخطاء البشرية، على سبيل المثال في:

- القرارات الإدارية (مثل الميزانية، والتوقيت، والمهام المطلوبة)
- هندسة النظم: دراسات الاستخدام (حالات التحميل)
- هندسة النظم: تحليل المتطلبات / تحديدها
- هندسة النظم: التحكم في التكوين

الافتراضات

- الحسابات / المحاكاة / تحليل العناصر المحدودة
- التصميم
- رسومات التصميم
- الاختبار (مثل إعدادات التحميل غير الصحيحة أو قياس الفشل)
- التحليل الإحصائي
- التصنيع
- مراقبة الجودة
- الصيانة
- كتيبات الصيانة
- التدريب
- تصنيف المعلومات وترتيبها
- ملاحظات حول المعلومات الميدانية (مثل المعلومات غير الصحيحة أو المبهمة)...... إلخ.

مع ذلك، يتمتع البشر بقدرة فائقة على اكتشاف هذه الأعطال وتصحيحها والارتجال عند حدوث حالات غير طبيعية. لذا، قد لا تكون السياسات التي تستبعد تمامًا التدخل البشري في عمليات التصميم والإنتاج لتحسين الوثوقية فعّالة. فبعض المهام يُجيد البشر أداءها، وبعضها الآخر تجيد الآلات أداءه. علاوة على

ذلك، قد تُسهم الأخطاء البشرية في الإدارة، وتنظيم البيانات والمعلومات، أو سوء استخدام العناصر، في عدم الوثوقية. وهذا هو السبب الرئيسي وراء عدم إمكانية تحقيق مستويات عالية من الوثوقية للأنظمة المعقدة إلا باتباع عملية هندسة أنظمة متينة، مع التخطيط والتنفيذ السليمين لمهام التحقق والتدقيق. ويشمل ذلك أيضًا التنظيم الدقيق لمشاركة البيانات والمعلومات، وخلق "ثقافة وثوقية"، تمامًا كما أن وجود "ثقافة سلامة" أمر بالغ الأهمية في تطوير الأنظمة الحساسة للسلامة.

قد يكون إجراء تنبؤ كمي دقيق لوثوقية الأنظمة أمرًا صعبًا ومكلفًا للغاية إذا تم عن طريق الاختبار. وعلى مستوى الأجزاء الفردية، يمكن غالبًا الحصول على نتائج وثوقية بدرجة ثقة عالية نسبيًا، حيث يُمكن اختبار العديد من عينات الأجزاء باستخدام ميزانية الاختبار المتاحة. مع ذلك، قد تفتقر هذه الاختبارات إلى الصلاحية على مستوى النظام بسبب الافتراضات التي تم وضعها عند اختبار الأجزاء. لقد أكد الباحثون في هذا المجال على أهمية الاختبار الأولي على مستوى الجزء أو النظام حتى حدوث العطل، والتعلم من هذه الأعطال لتحسين النظام ككل أو جزء منه. ويُستنتج عمومًا أن التنبؤ الدقيق والمطلق بالوثوقية - سواءً عن طريق مقارنة البيانات الميدانية أو الاختبار - غير ممكن في معظم الحالات. وقد يكون هناك استثناء في حالات الأعطال الناتجة عن مشاكل التآكل، مثل أعطال الإجهاد. وفي مقدمة معيار MIL-STD-785، ورد أنه ينبغي استخدام التنبؤ بالوثوقية بحذر شديد، إن لم يُستخدم فقط للمقارنة في دراسات المفاضلة.

7-1 التصميم من أجل الوثوقية

التصميم من أجل الوثوقية Design for Reliability (DfR) هو عملية تشمل أدوات وإجراءات لضمان تلبية المنتج لمتطلبات الوثوقية في بيئة استخدامه و طوال فترة عمره الافتراضي. ويُطبَّق التصميم من أجل الوثوقية في مرحلة تصميم المنتج لتحسين وثوقيته بشكل استباقي. غالبًا ما يُستخدم التصميم من أجل الوثوقية كجزء من استراتيجية شاملة للتصميم من أجل التميز .

يبدأ تصميم الوثوقية بتطوير نموذج (للنظام). تستخدم نماذج الوثوقية والتوافرية مخططات الكتل وتحليل شجرة الأعطال لتوفير وسيلة بيانية لتقييم العلاقات بين أجزاء النظام المختلفة. قد تتضمن هذه النماذج تنبؤات مبنية على معدلات الأعطال المستمدة من البيانات التاريخية. على الرغم من أن تنبؤات (بيانات الإدخال) غالبًا ما تكون غير دقيقة بشكل مطلق، إلا أنها قيّمة لتقييم الاختلافات النسبية في بدائل التصميم. ويمكن أيضًا استخدام معايير الصيانة ، مثل متوسط وقت الإصلاح، كمدخلات لهذه النماذج. يجب تحديد وتحليل أهم الأسباب الجذرية وآليات الفشل باستخدام الأدوات الهندسية. وينبغي تزويد المصممين بمجموعة متنوعة من الإرشادات العملية المتعلقة بالأداء والوثوقية ، لتمكينهم من ابتكار تصاميم ومنتجات ذات إجهاد منخفض، تحمي من التلف والتآكل المفرط ، أو تكون محمية من هذه الأضرار. وقد يلزم التحقق من صحة أحمال الإدخال (المتطلبات) ، بالإضافة إلى التحقق من وثوقية الأداء عن طريق الاختبار.

8-1 معايير وثوقية النظام الكمية – النظرية

Quantitative system reliability parameters—theory

تُحدد المتطلبات الكمية Quantitative requirements باستخدام معايير الوثوقية. ويُعد متوسط الزمن بين الأعطال mean time to failure (MTTF) المعيار الأكثر شيوعًا، والذي يُمكن تحديده أيضًا كمعدل الأعطال (يُعبّر عنه بدالة كثافة الاحتمال الشرطيProbability Density Function(PDF أو دالة التكرار) أو عدد الأعطال خلال فترة زمنية محددة. قد تكون هذه المعايير مفيدة لمستويات النظام العليا والأنظمة التي تعمل بشكل متكرر (مثل المركبات والآلات والمعدات الإلكترونية). تزداد الوثوقية مع زيادة متوسط الزمن بين الأعطالMTTF . ويُحدد متوسط الزمن بين الأعطال عادةً بالساعات، ولكن يُمكن استخدامه أيضًا بوحدات قياس أخرى، مثل الكيلو مترات أو الدورات. وقد يكون استخدام قيم متوسط الزمن بين الأعطال على مستويات النظام الدنيا مُضللًا للغاية، خاصةً إذا لم تُحدد أنماط وآليات الأعطال المرتبطة بها (الحرف F في متوسط الزمن بين الأعطال).

1. في حالات أخرى، تُحدد الوثوقية باحتمالية نجاح المهمة. على سبيل المثال، يمكن تحديد وثوقية رحلة طائرة مجدولة كاحتمالية لا بُعدية أو كنسبة مئوية، كما هو شائع في هندسة سلامة الأنظمة System safety engineering.

2. يُعدّ الجهاز أو النظام أحادي الاستخدام حالةً خاصةً من حالات نجاح المهمة. فهذه أجهزة أو أنظمة تبقى في حالة خمول نسبي وتعمل مرة واحدة فقط. ومن أمثلتها الوسائد الهوائية للسيارات، والبطاريات الحرارية، والصواريخ. وتُحدد وثوقية الاستخدام الأحاديSingle-shot reliability كاحتمالية نجاح لمرة واحدة، أو تُدمج في معيار ذي صلة. ويمكن تحديد وثوقية الصاروخ أحادي الاستخدام كشرط لاحتمالية الإصابة. بالنسبة لهذه الأنظمة، وتُعدّ احتمالية الفشل عند الطلب Probability of Failure on Demand (PFD) مقياس الوثوقية، وهي في الواقع قيمة "عدم التوافر". تُستمدّ احتمالية الفشل عند الطلب من معدل الفشل (تكرار الحدوث) ومدة المهمة للأنظمة غير القابلة للإصلاح Non-repairable systems .

3. بالنسبة للأنظمة القابلة للإصلاح، يُستمد هذا المقياس من معدل الأعطال، ومتوسط زمن الإصلاح Mean-Time-To-Repair (MTTR)، وفترة الاختبار. قد لا يكون هذا المقياس فريدًا لنظام معين، إذ يعتمد على نوع الطلب. بالإضافة إلى متطلبات مستوى النظام، يمكن تحديد متطلبات الوثوقية للأنظمة الفرعية الحرجة. في معظم الحالات، تُحدد معايير الوثوقية بفترات ثقة إحصائية مناسبة.

9-1 اختبار الوثوقية Reliability testing

يهدف اختبار الوثوقية أو التحقق منها **Reliability verification** إلى اكتشاف المشكلات المحتملة في التصميم في أقرب وقت ممكن، وبالتالي ضمان استيفاء النظام لمتطلبات الوثوقية (لاحظ الشكل 3-1) . وينبغي مراعاة موثوقية المنتج في جميع الظروف، مثل الاستخدام المتوقع والنقل والتخزين، خلال فترة عمره الافتراضي المحدد.

الشكل 3-1 الأختبار لأجل الوثوقية مهم جداً.

يتمثل الهدف في تعريض المنتج لظروف بيئية طبيعية أو اصطناعية لاختبار فعاليته وتقييم أدائه في ظل ظروف الاستخدام والنقل والتخزين الفعلية، وتحليل ودراسة مدى تأثير العوامل البيئية وآلية عملها. وذلك باستخدام معدات اختبار بيئية متنوعة لمحاكاة درجات الحرارة المرتفعة والمنخفضة والرطوبة العالية، وتغيرات درجات الحرارة في البيئة المناخية، لتسريع استجابة المنتج في بيئة الاستخدام، والتحقق من بلوغه الجودة المتوقعة في البحث والتطوير والتصميم والتصنيع.

يُطلق على التحقق من الوثوقية أيضًا اسم اختبار الوثوقية، وهو يشير إلى استخدام النمذجة والإحصاء وغيرها من الأساليب لتقييم وثوقية المنتج بناءً على عمره الافتراضي وأدائه المتوقع. تتطلب معظم المنتجات في السوق اختبار الوثوقية، مثل السيارات والدوائر المتكاملة والآلات الثقيلة المستخدمة في استخراج الموارد الطبيعية وبرمجيات الطائرات Aircraft auto software.

يمكن إجراء اختبارات الوثوقية على مستويات متعددة، وتتنوع أنواعها حيث يمكن اختبار الأنظمة المعقدة Complex systems على مستويات المكونات Components، ولوحات الدوائر، والوحدات، والتجميعات، والأنظمة الفرعية Subsystem ، والنظام ككل. (تختلف مسميات مستويات الاختبار باختلاف التطبيقات). على سبيل المثال، يساعد إجراء اختبارات فحص الإجهاد البيئي Environmental stress على مستويات أدنى، مثل الأجزاء الصغيرة أو التجميعات الصغيرة، في اكتشاف المشكلات قبل أن تتسبب في أعطال على مستويات أعلى. يستمر الاختبار خلال كل مستوى من مستويات التكامل، مرورًا باختبار النظام الكامل، والاختبار التطويري، وصولًا إلى الاختبار التشغيلي، مما يقلل من مخاطر البرنامج. ومع ذلك، لا يُزيل الاختبار مخاطر عدم الوثوقية تمامًا.

مع كل اختبار، قد تحدث أخطاء إحصائية من النوع الأول والنوع الثاني، وذلك تبعًا لحجم العينة، ومدة الاختبار، والافتراضات، ونسبة التمييز المطلوبة. هناك خطر رفض تصميم جيد بشكل خاطئ (خطأ من النوع الأول)، وخطر قبول تصميم سيئ بشكل خاطئ (خطأ من النوع الثاني).وسيتم مناقشة أنواع الأخطاء الإحصائية بالتفصيل في الفصل الثالث من هذا الكتاب .

ليس من الممكن دائمًا اختبار جميع متطلبات النظام. فبعض الأنظمة باهظة التكلفة للغاية للاختبار؛ وقد يستغرق رصد بعض أنماط الفشل سنوات؛ وتؤدي بعض التفاعلات المعقدة إلى عدد هائل من حالات الاختبار المحتملة؛ وتتطلب بعض الاختبارات استخدام نطاقات اختبار محدودة أو موارد أخرى. في مثل هذه الحالات، يمكن استخدام مناهج مختلفة للاختبار، مثل اختبار العمر المعجل (بشكل كبير) Accelerated life testing ، واختبار الإجهاد المعجل Highly accelerated stress وتصميم التجارب Design of experiments، والمحاكاة Simulations.

ويلعب مستوى الثقة الإحصائية Statistical confidence المطلوب دورًا في اختبار الوثوقية. وتزداد الثقة الإحصائية بزيادة مدة الاختبار أو عدد العناصر المختبرة. تُصمم خطط اختبار الوثوقية لتحقيق الوثوقية المحددة عند مستوى الثقة المحدد بأقل عدد ممكن من وحدات الاختبار وأقصر مدة. وتؤدي خطط الاختبار المختلفة إلى مستويات متفاوتة من المخاطر على كل من المُنتِج والمُستهلِك. وتؤثر الوثوقية المطلوبة والثقة الإحصائية ومستويات المخاطر لكل طرف على خطة الاختبار النهائية. لذا، ينبغي على العميل والمطور الاتفاق مسبقًا على كيفية اختبار متطلبات الوثوقية.

يُعدّ تعريف "الفشل" "Failure" جانبًا أساسيًا من اختبار الوثوقية. ورغم أن هذا قد يبدو بديهيًا، إلا أن هناك العديد من الحالات التي لا يكون فيها من الواضح ما إذا كان الفشل ناتجًا عن خلل في النظام نفسه. فالاختلافات في ظروف الاختبار، واختلافات المشغلين، والظروف الجوية، والظروف غير المتوقعة، كلها

عوامل تُحدث تباينًا بين العميل والشخص المكلف بتطوير النظام. ومن الاستراتيجيات المُتبعة لمعالجة هذه المشكلة استخدام عملية تنظيم مؤتمر للتقييم. حيث يضم مؤتمر التقييم ممثلين عن العميل، والمطور، ومنظمة الاختبار، ومنظمة الوثوقية، وأحيانًا مراقبين مستقلين. وتُحدد عملية مؤتمر التقييم في بيان العمل. حيث تُدرس كل حالة اختبار من قِبل المجموعة، ويتم تقييمها إما بنجاح أو فشل. ويُعتبر هذا التقييم هو النتيجة الرسمية التي يعتمدها مهندس الوثوقية.

كجزء من مرحلة تحديد المتطلبات، يقوم مهندس الوثوقية بتطوير استراتيجية اختبار بالتعاون مع العميل. تُوازن هذه الاستراتيجية بين احتياجات قسم الوثوقية، الذي يسعى للحصول على أكبر قدر ممكن من البيانات، والقيود المفروضة كالتكلفة والجدول الزمني والموارد المتاحة. تُوضع خطط وإجراءات اختبار لكل اختبار وثوقية، وتُوثّق النتائج.

يُعد اختبار الوثوقية شائعًا في صناعة الفوتونيات. ومن أمثلة اختبارات وثوقية الليزر اختبار العمر الافتراضي واختبار التشغيل الأولي. تتضمن هذه الاختبارات تعريض مجموعة من الليزرات لتقادم مُسرّع للغاية، في ظل ظروف مُحكمة. تُستخدم البيانات المُجمّعة من اختبارات العمر الافتراضي هذه للتنبؤ بالعمر الافتراضي المتوقع لليزر في ظل خصائص التشغيل المقصودة.

1-9-1 متطلبات اختبار الوثوقية Reliability test requirements

توجد معايير عديدة للاختبار، وتختلف باختلاف المنتج أو العملية قيد الاختبار، وتتمثل أبرزها في خمسة عناصر شائعة:

1. العمر الافتراضي للمنتج Product life span
2. الوظيفة المقصودة Intended function
3. ظروف التشغيل Operating Condition
4. احتمالية الأداء Probability of Performance
5. استثناءات المستخدم User exceptions

يمكن تقسيم العمر الافتراضي للمنتج إلى أربعة أقسام مختلفة لأغراض التحليل. العمر الإنتاجي هو العمر الاقتصادي المُقدّر للمنتج، ويُعرّف بأنه الفترة الزمنية التي يمكن خلالها استخدام المنتج قبل أن تصبح تكلفة الإصلاح غير مُبررة لاستمرار استخدامه. عمر الضمان هو الفترة الزمنية التي يجب أن يؤدي فيها

المنتج وظيفته خلال فترة زمنية مُحددة. عمر التصميم هو الفترة التي يأخذ فيها المصمم في الاعتبار، أثناء تصميم المنتج، العمر الافتراضي للمنتجات المنافسة ورغبات العملاء، ويضمن ألا يُسبب المنتج استياءً لدى العملاء.

قد تنشأ متطلبات اختبار الوثوقية من أي تحليل يتطلب تبرير التقدير الأولي لاحتمالية الفشل أو نمطه أو تأثيره. ويمكن توليد الأدلة بمستوى معين من الثقة عن طريق الاختبار. في الأنظمة البرمجية، تكون احتمالية الفشل مزيجًا من أعطال البرمجيات وأعطال الأجهزة. ويُعدّ اختبار متطلبات الوثوقية أمرًا معقدًا لعدة أسباب. ففي معظم الحالات، لا يكفي اختبار واحد لتوليد بيانات إحصائية كافية. كما أن إجراء اختبارات متعددة أو اختبارات طويلة الأمد يكون مكلفًا للغاية. بالإضافة إلى ذلك، فإن بعض الاختبارات غير عملية، وقد يصعب التنبؤ بالظروف البيئية طوال دورة حياة النظام Systems life-cycle.

وتُستخدم هندسة الوثوقية Reliability engineering لتصميم برنامج اختبار واقعي وميسور التكلفة، يوفر أدلة تجريبية على أن النظام ويفي بمتطلبات الوثوقية. وتُستخدم مستويات الثقة الإحصائية لمعالجة بعض هذه المخاوف. يُعبّر عن مُعامل مُحدد بمستوى ثقة مُناسب، على سبيل المثال، كأن يكون متوسط الزمن بين الأعطال (MTBF) 1000 ساعة بمستوى ثقة 90%. انطلاقًا من هذه المواصفات، يستطيع مهندس الوثوقية، على سبيل المثال، تصميم اختبار بمعايير واضحة لعدد الساعات وعدد الأعطال حتى يتم استيفاء المتطلبات أو فشلها. وتوجد أنواع مختلفة من الاختبارات الممكنة.

يؤثر الجمع بين مستوى الوثوقية المطلوب ومستوى الثقة المطلوب بشكل كبير على تكلفة التطوير والمخاطر التي قد يتعرض لها كل من العميل والمنتج. لذا، من الضروري توخي الحذر عند اختيار أفضل مزيج من المتطلبات، مثل فعالية التكلفة. يمكن إجراء اختبارات الوثوقية على مستويات مختلفة، كالمكونات والأنظمة الفرعية Subsystem والنظام System ككل. كما يجب مراعاة العديد من العوامل أثناء الاختبار والتشغيل، مثل درجات الحرارة والرطوبة القصوى، والصدمات، والاهتزازات، أو غيرها من العوامل البيئية (مثل فقدان الإشارة، أو التبريد، أو الطاقة؛ أو غيرها من الكوارث كالحرائق والفيضانات والحرارة المفرطة والانتهاكات المادية أو الأمنية أو غيرها من أشكال التلف أو التدهور). بالنسبة للأنظمة التي يجب أن تدوم لسنوات عديدة، قد يلزم إجراء اختبارات تسريع العمر الافتراضي.

2-9-1 طريقة الاختبار Testing method

تعتمد الطريقة المنهجية لاختبار الوثوقية على تحديد هدف الوثوقية أولاً، ثم إجراء اختبارات مرتبطة بالأداء لتحديد موثوقية المنتج. يجب أن يحدد اختبار التحقق من الوثوقية في الصناعات الحديثة بوضوح كيفية ارتباطه بأداء الوثوقية الكلي للمنتج، وكيف تؤثر الاختبارات الفردية على تكلفة الضمان ورضا العملاء.

10-1 الوثوقية الإنشائية Structural reliability

الوثوقية الإنشائية، أو وثوقية المنشآت، هي تطبيق نظرية الوثوقية على سلوك المنشآت. وتُستخدم في تصميم وصيانة أنواع مختلفة من المنشآت، بما في ذلك المنشآت الخرسانية والفولاذية. في دراسات الوثوقية الإنشائية، تُنمذج كل من الأحمال والمقاومات كمتغيرات احتمالية. وباستخدام هذا النهج، تُحسب احتمالية فشل المنشأة.

11-1 مقارنة بهندسة السلامة Comparison to safety engineering

غالبًا ما ترتبط وثوقية السلامة Reliability for safety ووثوقية التوافرية reliability for availability ارتباطًا وثيقًا. قد يؤدي فقدان توافر نظام هندسي Subway system is unavailable إلى خسائر مالية. فإذا تعطل نظام مترو الأنفاق، سيتكبد مشغل المترو خسائر مالية عن كل ساعة توقف فيها النظام. وتزداد هذه الخسائر إذا تضررت السلامة. يرتبط تعريف الوثوقية باحتمالية عدم حدوث عطل. قد يتسبب العطل في فقدان السلامة، أو فقدان التوافرLoss of availability ، أو كليهما. ومن غير المرغوب فيه فقدان السلامة أو التوافر في نظام حيوي.

تهتم هندسة الوثوقية بالتقليل الشامل للأعطال التي يمكن أن تؤدي إلى خسائر مالية للجهة المسؤولة، بينما تركز هندسة السلامة على تقليل مجموعة محددة من أنواع الأعطال التي يمكن أن تؤدي بشكل عام إلى فقدان الأرواح أو الإصابة أو تلف المعدات. يمكن أن تتحول مخاطر الوثوقية Reliability hazards إلى حوادث تؤدي إلى خسارة في الإيرادات للشركة أو العميل، على سبيل المثال بسبب التكاليف المباشرة وغير المباشرة المرتبطة بما يلي: خسارة الإنتاج بسبب عدم توفر النظام System unavailability ؛ ارتفاع أو انخفاض الطلب على قطع الغيار بشكل غير متوقع؛ تكاليف الإصلاح؛ ساعات العمل؛ إعادة التصميم أو انقطاعات الإنتاج العادي.

غالبًا ما تتسم هندسة السلامة Safety engineering بتخصصها الشديد، إذ تقتصر على صناعات أو تطبيقات أو مجالات محددة تخضع لرقابة صارمة. وتركز بشكل أساسي على مخاطر سلامة الأنظمة التي

قد تؤدي إلى حوادث جسيمة، بما في ذلك: الخسائر في الأرواح، وتلف المعدات، أو الأضرار البيئية. ولذلك، فإن متطلبات موثوقية النظام الوظيفية ذات الصلة غالبًا ما تكون عالية للغاية. ورغم أنها تتعامل مع حالات الفشل غير المرغوب فيها بنفس طريقة هندسة الوثوقية، إلا أنها أقل تركيزًا على التكاليف المباشرة، ولا تهتم بإجراءات الإصلاح بعد وقوع الفشل. ومن الاختلافات الأخرى مستوى تأثير حالات الفشل على المجتمع، مما يؤدي إلى ميل الحكومات أو الهيئات التنظيمية إلى فرض رقابة صارمة (مثل الصناعات النووية، والفضاء، والدفاع، والسكك الحديدية، والنفط).

12-1 تقييم الوثوقية التشغيلية Reliability operational assessment

بمجرد بدء إنتاج الأنظمة أو الأجزاء، تسعى هندسة الوثوقية إلى رصد أوجه القصور وتقييمها وتصحيحها. يشمل الرصد المراقبة الإلكترونية والمرئية للمعايير الحرجة التي تم تحديدها خلال مرحلة تصميم تحليل شجرة الأعطال Fault Tree Analysis. يعتمد جمع البيانات بشكل كبير على طبيعة النظام. تمتلك معظم المؤسسات الكبيرة فرقًا لمراقبة الجودة تجمع بيانات الأعطال المتعلقة بالمركبات والمعدات والآلات. غالبًا ما يتم تتبع أعطال المنتجات الاستهلاكية من خلال عدد المرتجعات. بالنسبة للأنظمة المخزنة أو الاحتياطية، من الضروري وضع برنامج مراقبة رسمي لفحص واختبار عينات عشوائية. أي تغييرات تطرأ على النظام، مثل التحديثات الميدانية أو إصلاحات الاستدعاء، تتطلب اختبارات وثوقية إضافية لضمان وثوقية التعديل. نظرًا لعدم إمكانية التنبؤ بجميع أنماط الأعطال في نظام معين، وخاصة تلك التي تتضمن عنصرًا بشريًا، فمن المؤكد حدوث أعطال. يتضمن برنامج الوثوقية أيضًا تحليلًا منهجيًا للأسباب الجذرية يحدد العلاقات السببية المتضمنة في العطل، بحيث يمكن تنفيذ إجراءات تصحيحية فعالة. عند الإمكان، يتم إبلاغ قسم هندسة الوثوقية بأعطال النظام والإجراءات التصحيحية

1- 13 وثوقية منظومات القدرة الكهربائية

وثوقية منظومات القدرة الكهربائية (أو وثوقية الشبكة الكهربائية) هي احتمالية التشغيل الطبيعي للشبكة الكهربائية في وقت محدد. وتُحدد مؤشرات الوثوقية قدرة المنظومة الكهربائية على تزويد المستهلكين بالكهرباء حسب الحاجة من خلال قياس تكرار انقطاعات الإمداد ومدتها وحجمها.

إن أمن منظومات القدرة الكهربائية (ويُسمى أيضًا الوثوقية التشغيلية)، أي قدرة المنظومة على الصمود أمام حالات الطوارئ الآنية (الأحداث السلبية، مثل فقدان غير متوقع لقدرة التوليد). تأريخيا، إي ما قبل الستينيات: تركز التقييم المبكر لوثوقية منظومات القدرة الكهربائية على المعايير الحتمية، مثل شرط تحقق "N-1" من وجود المكونات (لضمان استقرار النظام في حالة تعطل أحد مكوناته). وافتقرت هذه الأساليب، أو لم تعتمد بشكل كبير، على البيانات الاحتمالية المتقدمة، ويعود ذلك غالبًا إلى محدودية القدرة الحاسوبية

في ذلك الوقت وتوافر البيانات. وفي ستينيات وثمانينيات القرن العشرين في ظهور الأساليب الاحتمالية حيث خلال هذه الفترة، ازداد تطبيق نظرية الاحتمالات على منظومات القدرة الكهربائية بشكل ملحوظ. بدأ الباحثون بتطبيق تقنيات لحساب مؤشرات الوثوقية (تكرار الانقطاعات ومدتها وحجمها). كما طُرح مفهوم مجموعات القطع الدنيا لتحليل أنماط فشل الأنظمة المعقدة. ومن فترة التسعينيات في القرن الماضي وحتى الآن تم استخدام النمذجة المتقدمة والأساليب القائمة على البيانات حيث أدى هذا التوجه نحو تحرير قطاع الطاقة، وزيادة اعتماد الصناعة على الكهرباء، ودمج مصادر الطاقة المتجددة، إلى ضرورة إجراء تحليلات أكثر تعقيدًا للموثوقية. وتشمل التقنيات الحديثة والمتطورة ما يلي:

- محاكاة مونت كارلو المتسلسلةSequential Monte Carlo Simulation : تُستخدم لتحليل تأثير تقادم المكونات والأعطال المعقدة التي تعتمد على الزمن.
- تكامل البيانات: تُستخدم قواعد البيانات التاريخية واسعة النطاق (مثل تلك الموجودة في أدوات مثل Easy Power حاليًا لتتبع معدلات أعطال المعدات.
- تقييم المرونة: يتجاوز مفهوم الوثوقية (منع الأعطال) ليشمل أيضًا المرونة (كيفية تحمل النظام للأحداث المتطرفة ذات الاحتمالية المنخفضة وتعافيه منها).
- اتخاذ القرارات بناءً على المخاطر: غالبًا ما تجمع الأساليب الحديثة، كتلك التي نوقشت في مجلة Science Direct في عددها 114 الصادر في سنة 1956 ، بين المناهج النوعية والكمية، مع اعتماد كبير على التحليل الإحصائي لبيانات ميدانية فعلية.

وقد حفز هذا التطور الحاجة إلى تحقيق التوازن بين التكلفة العالية لزيادة الوثوقية وضرورة توفير الطاقة بشكل آمن ومستمر، وفي كثير من الحالات، بشكل آلي.

كما أشرنا سابقا ، إن الوثوقية مصطلح مجرد يعني التحمل والاعتمادية والأداء الجيد. أما بالنسبة للأنظمة الهندسية، فهي أكثر من مجرد مصطلح مجرد؛ إنها شيء يمكن حسابه وقياسه وتقييمه وتخطيطه وتصميمه في قطعة من المعدات أو في نظام. تعني الوثوقية قدرة النظام على أداء الوظيفة التي صُمم من أجلها في ظل ظروف التشغيل التي سيواجهها خلال عمره المتوقع. تاريخيًا، قُسِّم نظام الطاقة أو منظومة القدرة الكهربائية إلى ثلاثة مجالات تشغيل شبه مستقلة كما يلي:

1. نظام التوليد: وتشمل المنشآت الخاصة بتوليد الكهرباء من مصادر طاقة اقتصادية.

2. نظام النقل: وتشمل نظام نقل الطاقة لنقل كميات كبيرة من الطاقة من منشآت التوليد إلى مناطق جغرافية محددة.

3. نظام التوزيع: وتشمل إنظمة توزيع الطاقة داخل منطقة جغرافية محددة إلى المستهلكين الأفراد (مثل: السكني، والتجاري، والصناعي، إلخ).

من الناحية المثالية، تعني وثوقية منظومة القدرة الكهربائية من وجهة نظر المستهلكين استمرار إمداد الطاقة دون انقطاع من أنظمة التوليد أو النقل أو التوزيع. في الواقع، تتمثل المؤشرات الرئيسية لوثوقية نظام الطاقة بالنسبة للمستهلكين في تكرار ومدة انقطاعات التيار الكهربائي عند نقطة استهلاكهم (أي نقطة الحمل). من وجهة نظر هندسية، يكمن السؤال في كيفية تحديد تكرار ومدة انقطاعات نقطة الحمل رياضيًا؟

يتناول هذا الكتاب كيفية تقييم أنظمة التوليد والنقل والتوزيع من خلال أمثلة عملية.

1- 14 تقييم وثوقية أنظمة القدرة الكهربائية

تتمثل الوظيفة الأساسية لنظام القدرة الكهربائية في تزويد عملائه بالطاقة الكهربائية بأكبر قدر ممكن من الكفاءة والوثوقية. وقد استُخدمت بعض التطبيقات البسيطة لأساليب الاحتمالات في حسابات سعة احتياطي التوليد منذ أربعينيات القرن العشرين؛ إلا أن الاهتمام الحقيقي بتقييم وثوقية أنظمة الطاقة لم يبدأ بالانتشار إلا بعد عام 1965، متأثرًا بشكل ملحوظ بانقطاع التيار الكهربائي في مدينة نيويورك في ذلك العام. وتتطور رياضيات الوثوقية باستمرار لمواكبة التغيرات التقنية في عمليات وتكوينات أنظمة الطاقة. وفي الوقت الحاضر، تُؤثر مصادر الطاقة المتجددة، مثل طاقة الرياح وأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية، تأثيرًا كبيرًا على تشغيل أنظمة التوليد والنقل والتوزيع.

في الوقت الراهن، يدفع تحرير قطاع الكهرباء في الدول المتقدمة شركات الكهرباء إلى خوض غمار تجارب غير مسبوقة. ولأول مرة، يبحث المستهلك عن خدمات ذات قيمة مضافة من شركات الكهرباء، وإلا سيبدأ بالبحث عن بدائل. وقد تسبب عدم إدراك احتياجات المستهلك في عدد كبير من حالات الإفلاس في العديد من القطاعات. ويُجبر توجه قطاع الكهرباء نحو سوق تنافسية جميع الشركات ذات الصلة على تقييم تركيزها ونقاط قوتها وضعفها واستراتيجياتها. ومن أبرز التحديات التي تواجه شركات الكهرباء زيادة القيمة السوقية للخدمات التي تقدمها مع ضمان مستوى مناسب من الوثوقية، وخفض تكاليف التشغيل والصيانة والإنشاء لتوفير الكهرباء للمستهلكين بأسعار أقل. بالنسبة لأي نظام طاقة يزود مجموعة محددة من العملاء، توجد قيمة مثلى للوثوقية تؤدي إلى أقل التكاليف الإجمالية. وتُعدّ مفاهيم تخطيط الوثوقية الكمية القائمة على القيمة، والمُقدّمة في هذا الكتاب، محاولةً لتحقيق هذه الوثوقية المثلى في أنظمة الطاقة.

تقليديًا، يُؤخذ في الاعتبار عنصران مترابطان لوثوقية منظومات القدرة الكهربائية ، أي تُصنَّف دراسات وثوقية منظومات القدرة الكهربائية إلى قسمين رئيسيين:

1) كفاية منظومات القدرة الكهربائية

إن كفاية منظومات القدرة الكهربائية تتعلق بوجود مرافق كافية داخل منظومة القدرة الكهربائية لتلبية احتياجات المستهلكين من الطاقة. وتشمل هذه المرافق المولدات اللازمة، ومرافق النقل والتوزيع.

2) أمن منظومات القدرة الكهربائية

أمن منظومات القدرة الكهربائية (ويُسمى أيضًا الوثوقية التشغيلية): أي قدرة منظومة القدرة الكهربائية على الاستجابة والصمود للاضطرابات. وتشمل هذه الاضطرابات البسيطة والكبيرة و حالات الطوارئ الآنية (الأحداث السلبية، مثل فقدان غير متوقع لقدرة التوليد) التي تؤدي إلى عدم استقرار ديناميكي أو عابر أو في جهد منظومات القدرة .

1-14-1 تقييم وثوقية نظام التوليد Generation system reliability evaluation

عند تقييم كفاية قدرة التوليد، يُعرَّف الفشل بشكل عام بأنه "انقطاع التيار الكهربائي"، وهو انقطاع ناتج عن عدم كفاية القدرة. تُعرَّف الوثوقية من حيث احتمالية انقطاع التيار الكهربائي خلال فترة زمنية محددة، عادةً سنة، أو متوسط انقطاع التيار الكهربائي المتوقع Loss of Load Expectation (LOLE) بالأيام في السنة. لكي يحدث انقطاع في التيار الكهربائي، يجب أن تنخفض قدرة النظام إلى مستوى معين نتيجة للصيانة الدورية و/أو الانقطاعات القسرية لوحدات التوليد الأخرى، بهامش يتجاوز الاحتياطي الدوار لتلبية ذروة حمل النظام. وحتى في هذه الحالة، قد لا يحدث انقطاع في التيار الكهربائي لأن حمل النظام لا يكون دائمًا عند ذروته.

لحساب مقدار الوقت الذي لا تستطيع فيه السعة التوليدية المؤسسة تلبية الحمل الفعلي، يجب إدخال منحنى مدة الحمل في الحسبان. يمكن حساب مؤشر وثوقية التوليد الأكثر شيوعًا لـ LOLE إذا كانت جميع المعلمات، وهي: معدلات الانقطاع القسري لوحدات التوليد المختلفة،وتوقعات الحمل، ومنحنى مدة الحمل، Load Duration Curve والاحتياطي الدوار، والتحسينات الأخرى اللازمة (مثل وثوقية نظام النقل). وقد بُذلت جهود بحثية كبيرة لتطوير أدوات ونماذج تقييم الوثوقية المطبقة على كفاية سعة التوليد على مدى العقود الأربعة الماضية. وتقوم شركات الكهرباء بشكل روتيني بإجراء تقييمات احتمالية لمتطلبات هامش احتياطي التوليد باستخدام الأدوات المتطورة القائمة على محاكاة مونت كارلو وأساليب تعداد الطوارئ.

تشمل التطورات الحديثة في تقييم كفاية القدرة التوليدية، على سبيل المثال لا الحصر، نماذج جديدة لوحدات الطاقة المحدودة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية والطاقة الحرارية الأرضية وغيرها من تقنيات الطاقة المبتكرة، بالإضافة إلى نمذجة محطات الطاقة التجارية ونماذج تصميم سوق القدرة للأسواق غير

الخاضعة للتنظيم. وبذلك، يستطيع مهندس تخطيط النظام تحديد ما إذا كان مستوى الوثوقية كافيًا، وتحديد تأثير الإجراءات البديلة مثل زيادة الاحتياطي الدوار، وإضافة وحدة توليد، وتغيير جداول الصيانة والربط مع المناطق الأخرى.

2-14-1 تقييم وثوقية نظام النقل Transmission system reliability evaluation

في الدراسات السابقة حول وثوقية أنظمة توليد الطاقة، اقتصرت الدراسة على أنظمة إنتاج الطاقة فقط، بينما تم تجاهل أنظمة النقل والتوزيع.ومن الناحية الرياضية، تم افتراض أن أنظمة النقل والتوزيع تتمتع بوثوقية تامة، وهو ما لم يكن صحيحًا في الواقع. إن تحديد احتمالية انقطاع سعة النظام بناءً على معدلات الانقطاع القسري للمولدات وحدها سيؤدي إلى نتائج متفائلة وغير دقيقة بشكل مفرط.

يتكون نظام النقل من خطوط نقل عالية الفولتية ومحطات ثانوية ، تتضمن معدات وأنظمة تحكم مختلفة. يمكن حساب متوسط معدل الأعطال القسري ومدة انقطاع التيار لكل مكون، مثل أقسام الخطوط والمحولات وقواطع الدائرة، في نظام النقل، كما يمكن حساب وثوقية نقطة التحميل باستخدام نموذج وثوقية مناسب.

تعتمد وثوقية نقطة التحميل على وثوقية كل مكون على حدة؛ ومع ذلك، فهي تعتمد أيضًا على عوامل أخرى. العاملان الأكثر أهمية هما تكوين النظام والبيئة. نظام النقل عبارة عن شبكة من الخطوط والمعدات. لا يؤدي تعطل أحد المكونات بالضرورة إلى تعطل النظام بأكمله. يوجد قدر كبير من التكرار المتأصل في أجزاء أخرى من نظام النقل. عامل آخر يؤثر على وثوقية نظام النقل هو الأحوال الجوية والبيئة التي يعمل في ظلها. تنتج أعطال العديد من المكونات الخارجية بسبب البرق، والثلوج، والرياح العاتية، وما إلى ذلك. بالإضافة إلى ذلك، لا تكون الأعطال مستقلة دائمًا كما هو مفترض عمومًا في الحسابات الإحصائية.

قد يؤدي تعطل أحد المكونات إلى زيادة احتمالية تعطل مكون آخر. أحد أنواع هذه الأعطال المترابطة هو العطل المشترك، أي تعطل أكثر من مكون واحد لنفس السبب، والذي يحدث عادةً بشكل متكرر في الأحوال الجوية السيئة أكثر من الأحوال الجوية الجيدة. في تحليل وثوقية نظام النقل، تُخصص معدلات فشل مختلفة لظروف جوية مختلفة، ويجب مراعاة ترابط الأعطال، على الأقل في الأحوال الجوية السيئة. يتضح أن التحليل المفصل قد يكون معقدًا للغاية، ويزداد تعقيدًا عند النظر إلى نظام التوليد والنقل المركب معًا. ويُعدّ استخدام الحواسيب القوية إلزامياً تقريباً لأي تحليل لوثوقية النظام. وقد أُنجزت أعمالٌ هامة في التقييمات الاحتمالية لأنظمة النقل لتعزيز المعايير الحتمية الحالية في تخطيط وتصميم أنظمة النقل.

3-14-1 تقييم وثوقية نظام التوزيع Distribution system reliability evaluation

يختلف تطبيق مفاهيم الوثوقية على أنظمة التوزيع عن تطبيقات التوليد والنقل، في كونه أكثر تركيزًا على نقاط تحميل المستهلك بدلًا من كونه مُوجَّهًا نحو النظام ككل، ويُؤخذ نظام التوزيع المحلي في الاعتبار بدلًا من النظام المتكامل بأكمله الذي يشمل مرافق التوليد والنقل. كما تُركِّز وثوقية التوليد والنقل على السعة واحتمالية فقدان الحمل، مع إيلاء بعض الاهتمام للمكونات، بينما تنظر وثوقية التوزيع إلى جميع الجوانب الهندسية : التصميم والتخطيط والتشغيل. ولأن نظام التوزيع أقل تعقيدًا من نظام التوليد والنقل المتكامل، فإن الرياضيات الاحتمالية المستخدمة فيه أبسط بكثير من تلك المطلوبة لتقييمات وثوقية التوليد والنقل.

من المهم ملاحظة أن نظام التوزيع يمثل حلقة وصل حيوية بين نظام الطاقة الرئيسي وعملائه. في كثير من الحالات، تكون هذه الروابط شعاعية بطبيعتها، مما يجعلها عرضة لانقطاعات التيار الكهربائي لدى العملاء نتيجة انقطاع واحد. تستخدم دائرة التوزيع الشعاعية عادةً مغذيات رئيسية وموزعات جانبية لتلبية احتياجات العملاء من الطاقة. في الماضي، حظي قطاع التوزيع في نظام الطاقة باهتمام أقل بكثير من حيث تخطيط الوثوقية مقارنةً بقطاعي التوليد والنقل. والسبب الرئيسي وراء ذلك هو أن قطاعي التوليد والنقل يتطلبان استثمارات رأسمالية ضخمة، وأن انقطاعات التيار فيهما قد تتسبب في عواقب اقتصادية كارثية واسعة النطاق على المجتمع.

تشير الدراسات إلى أن أكثر من 80% من انقطاعات التيار الكهربائي لدى المستهلكين تحدث بسبب أعطال في شبكة التوزيع. وتُعدّ شبكة التوزيع الحلقة الأضعف بين مصدر الإمداد ونقاط استهلاك المستهلكين. وعلى الرغم من أن أي مشروع لتعزيز شبكة التوزيع يُعدّ غير مكلف نسبيًا مقارنةً بمشاريع تحسين التوليد أو النقل، فإن شركات الكهرباء عادةً ما تنفق مبالغ طائلة من رأس المال وميزانية الصيانة على عدد كبير من مشاريع تحسين شبكة التوزيع.

في الوقت الحالي، في العديد من هيئات وشركات الكهرباء، تُحدد مستويات استمرارية الخدمة المقبولة بمقارنة مؤشرات تكرار الانقطاع ومدته الفعلية مع أهداف محددة مسبقاً. على سبيل المثال، تحتوي التقارير الشهرية لإحصاءات استمرارية الخدمة، التي تُصدرها العديد من هيئات وشركات الكهرباء، على أهداف أهداف محددة مسبقاً لمؤشرات وثوقية النظام لأغراض مقارنة الأداء. من المسلّم به منذ فترة طويلة، خاصة في بيئة السوق غير المنظمة، أنه لا يمكن تطبيق القواعد العامة والمعايير الضمنية بطريقة متسقة على العدد الكبير جدًا من قرارات الاستثمار في رأس المال والصيانة، وقرارات التشغيل التي تُتخذ بشكل روتيني. على الرغم من توفر بعض برامج الوثوقية ذات القدرات المحدودة، إلا أنه لا توجد هيئات وشركات كهرباء تقريبًا تُجري دراسات توسعة لأنظمة التوزيع باستخدام نماذج احتمالية. على عكس نظام النقل

الرئيسي الذي يخضع لمعايير لجان وثوقية الكهرباء في وزارات الكهرباء الوطنية في البلدان العربية (إن وجدت) القطعية في تخطيط وتصميم أنظمة النقل، فإن نظام التوزيع لا يخضع لأي معايير تخطيط مُعتمدة. ُطلب من هيئات وشركات التوزيع فقط تقديم مؤشرات أداء نظام التوزيع التاريخية إلى الهيئات التنظيمية.

تتوفر فرصٌ وافرة لهيئات ولشركات توزيع الكهرباء للاستثمار بحكمة في توسيع شبكة التوزيع لتلبية النمو المتوقع في الأحمال، وذلك باستخدام أساليب الوثوقية الاحتمالية التي من شأنها القضاء على مخاطر الإفراط في الاستثمار أو نقصه في الشبكة، مع توفير أعلى مستويات الوثوقية بتكلفة مناسبة. ويعود تردد هيئات وشركات الكهرباء في استخدام أساليب الوثوقية في تخطيط وتصميم شبكات التوزيع إلى الاعتقاد السائد بأنها تتطلب أدوات حاسوبية احتمالية متطورة ومهندسين متخصصين في هندسة وثوقية أنظمة الطاقة. ويهدف هذا الكتاب إلى تصحيح هذا الاعتقاد الخاطئ، ويقدم نماذج عملية للوثوقية الاحتمالية لتخطيط وتصميم شبكات التوزيع.

كذلك يتطرق الكتاب إلى مؤشرات الوثوقية في نظام التوزيع التى تُستخدم مؤشرات التكرار والمدة والاحتمالية لتقييم أداء نظام التوزيع. تُحسب هذه المؤشرات لنقطة التحميل ولنظام التوزيع ككل. لقياس موثوقية نقطة التحميل، يُستخدم كل من تكرار الأعطال (λ) وعدم التوافر (U) ومتوسط وقت الإصلاح (r). حيث يُمثل λ مؤشر التكرار، وU مؤشر الاحتمالية، وr مؤشر المدة. لقياس أداء نظام التوزيع، تُستخدم مؤشرات التكرار مثل SAIFI، ومؤشرات المدة مثل CAIDI، ومؤشرات الاحتمالية مثل SAIDI وASAI، ومؤشرات الطاقة مثل AENS وEENS وECOST. تُستمد مؤشرات النظام القائمة على التكرار والمدة والاحتمالية من مؤشرات نقاط التحميل وعدد المشتركين فيها. يتطلب تقييم مؤشرات الطاقة معرفة متوسط الحمل عند نقاط التحميل.

ولابد أن نذكر القارئ الكريم بان دراسات الوثوقية تعتمد بشكل أساسي على نظريات الاحتمالات والإحصاء، والتي تستخدم أيضاً نظريات المجموعات. لذا، لفهم وثوقية أنظمة القدرة الكهربائية، لا بد من مراجعة المفاهيم الأساسية للإحصاء والاحتمالات ونظرية المجموعات.

15-1 تنظيم فصول الكتاب

يُستخدم عادةً منهجان لتقييم وثوقية منظومات القدرة الكهربائية ، وهما: التقييم التاريخي والتقييم التنبؤي. يتضمن التقييم التاريخي فمثلاً جمع وتحليل بيانات انقطاع نظام التوزيع وانقطاعات التيار الكهربائي لدى المشتركين. من الضروري لهيئات ولشركات الكهرباء قياس مستويات أداء وثوقية نظام التوزيع الفعلية وتحديد مؤشرات الأداء لتقييم الوظيفة الأساسية المتمثلة في توفير إمدادات طاقة موثوقة وفعالة من حيث

التكلفة لجميع أنواع المشتركين. يُعرف التقييم التاريخي عمومًا بأنه قياس الأداء السابق للنظام من خلال تسجيل تكرار ومدة وأسباب أعطال مكونات النظام وانقطاعات التيار الكهربائي لدى المشتركين بشكل منتظم. أما التقييم التنبؤي للوثوقية، فيجمع بين بيانات انقطاع المكونات التاريخية والنماذج الرياضية لتقدير أداء التكوينات المحددة. لذا، تعتمد التقنيات التنبؤية على نوعين أساسيين من البيانات لحساب وثوقية الخدمة: معايير وثوقية المكونات والتكوينات المادية للشبكة.

يتناول هذا الكتاب تقييمات وثوقية منظومات القدرة الكهربائية ، سواءً التاريخية منها أو التنبؤية. وقد أعطيت نماذج وثوقية عملية بسيطة وسهلة الاستخدام، وتم توضيح تطبيقاتها باستخدام منظومات توليد وشبكات نقل وتوزيع عملية. وقد أُجريت جميع حسابات الوثوقية تقريبًا يدويًا، ولا حاجة إلى برامج حاسوبية معقدة. وقد استُخدم مثلاً نظام توزيع حي بسيط ولكنه واقعي بشكل متكرر لتوضيح تطبيق نماذج الوثوقية المختلفة التي نم اعطائها وعرضها في هذا الكتاب. ولتسهيل الأمر على القراء، تكررت النماذج والصيغ الرياضية للوثوقية ذات الصلة بتطبيقات محددة في الفصول عند الضرورة للحفاظ على سلاسة فهم النماذج والمفاهيم بحيث أن كل فصل يعد مستقلاً عن الفصول الأخرى، ولا يلزم الرجوع إلى فصول أخرى لفهم المفاهيم الجديدة الواردة في فصل معين.

يُقسّم الكتاب على النحو التالي:

يُقدّم الفصل الأول التعريف الأساسي لمصطلح "الوثوقية" وتطبيقه على. منظومات القدرة الكهربائية كما يُقدّم وصفًا موجزًا للوضع الراهن لتطبيقات منهجية الوثوقية في قطاعات توليد ونقل وتوزيع الطاقة في نظام الطاقة.

يصف الفصلان 2 و3 بإيجاز شديد أساسيات نظريات الاحتمالات والإحصاء ونظريات المجموعات وأنواع التوزيعات في علم الإحصاء . على الرغم من أن نماذج الاحتمالات والوثوقية الأساسية المعروضة مع أمثلة عددية في الفصلين 2 و3 متوفرة في العديد من الكتب الدراسية، إلا أن هذه النماذج تُكرر في هذين الفصلين لمساعدة القراء على فهم النماذج التي ستُستخدم على نطاق واسع في الفصول اللاحقة من هذا الكتاب. ولا تتمتع غالبية الأنظمة في العالم الحقيقي ببنية بسيطة أو تُدار بمنطق تشغيلي معقد. ولحل الشبكات أو الأنظمة المعقدة، يلزم استخدام تقنيات نمذجة وتقييم إضافية لتقييم وثوقية هذه الشبكات أو الأنظمة.

يُعطي الفصل الرابع مبادئ الوثوقية تطبيقات نماذج الاحتمالات والإحصاء المُقدمة في الفصلين الثاني والثالث باستخدام أمثلة عددية بسيطة في مبادئ الوثوقية . يُقدم الفصل الرابع أيضاً أيضًا نماذج لتقييم وثوقية تكوينات الشبكات المعقدة. وقد تم توضيح النماذج الأساسية لحلول الشبكات المعقدة باستخدام أمثلة عددية. ويستند النموذج الجديد لتقييم وثوقية الأنظمة الكهربائية بطريقتي مخطط شجرة الأعطال وشجرة الأحداث

التي نوقشت في الفصل الخامس.

في الفصل الخامس أيضا، تُوضَّح النماذج الأساسية لحلول الشبكات المعقدة باستخدام العديد من الأمثلة العددية. يُقدِّم الفصل الخامس نماذج لتقييم وثوقية تكوينات الشبكات المعقدة. بعض المنهجيات الشائعة في التطبيق العملي هي: (1) طرق تعداد الحالات (طرق فضاء الأحداث)، (2) طرق اختزال الشبكة و(3) طرق تعداد المسارات.

في الفصل السادس يقدم طرق تقييم وثوقية نظام التوليد وشرح بناء نموذج التوليد ونموذج الحمل باستخدام الطرق الإحتمالية وكيفية ايجاد توقعات فقدان الحمل وحساب حساسية النظام ومقدار المخاطرة وكذلك تضمين تأثير الصيانة على وحدات التوليد.

في الفصل السابع، يُقدَّم وصف لكيفية إجراء تنبؤات تقييم وثوقية نظام التوليد وتعريف لمؤشرات فقدان الطاقة وكذلك وصفاً لكيفية التعامل مع عدم اليقين في تخمين الأحمال والتوسعات المستقبلية في وحدات التوليد وسعاتها.

كما تم في الفصل الثامن عرض تقييم وثوقية المنظومات المترابطة واساليب وطرق التعامل معها .

وفي الفصل التاسع تم التطرق إلى تقييم وثوقية أنظمة نقل القدرة الكهربائية ودراسة وثوقيتها في الظروف الجوية العادية والعاصفة. حيث تم شرح إستخدام الطرق التالية لتقييم وثوقية نظام النقل:

تقنية ماركوف Markov technique . (الطريقة الدقيقة). طريقة التردد والمدة Frequency and duration method.وكذلك تم شرح الطرق التقريبية واعطاء امثلة عملية على كل واحدة منها.

في الفصلين العاشروالحادي عشر تم استعراض طرق تحليل وثوقية أنظمة توزيع القدرة الكهربائية وشرح الطرق الحتمية والطرق الإحتمالية وكيفية استخلاص طرق لحسابات كمية للوثوقية و التوافر لتكوينات جديدة مقترحة لأنظمة توزيع الطاقة الصناعية والتجارية. وتم تُحلَّيل عدة أمثلة، بما في ذلك نظام شعاعي بسيط ونظام انتقائي أساسي ونظام انتقائي ثانوي.

وفي الفصل الثاني عشر تم استعراض تقييم وثوقية شبكات الطاقة المتجددة والطرق الحديثة المستخدمة في هذا الموضوع الحيوي المهم .

كما استعرض الفصل الثالث عشر طرق تحسين الوثوقية بصورة عامة وشرح لمفهوم تماسك الوثوقية وكذلك اهمية استخدام اجهزة اعادة الغلق الذاتي (التلقائي) في المنظومات الشعاعية في المناطق الريفية النائية.

الفصل 2
أساسيات علم الإحصاء ونظرية الاحتمالات

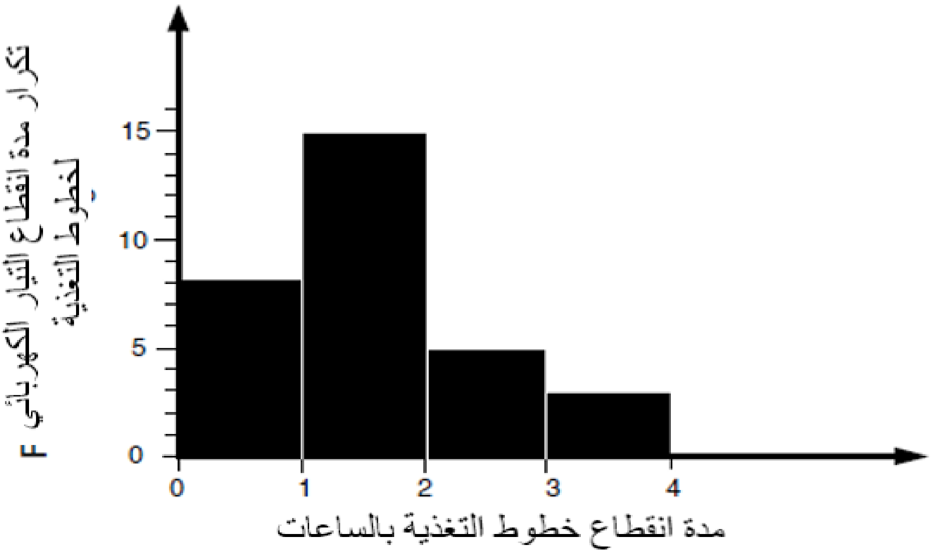
2-1 مقدمة

الإحصاء هو العلم الذي يُعنى بجمع البيانات وتنظيمها وتحليلها وتفسيرها وعرضها. عند تطبيق الإحصاء على مشكلة علمية أو صناعية أو اجتماعية، من المتعارف عليه البدء بمجتمع إحصائي أو نموذج إحصائي للدراسة. يمكن أن تكون المجتمعات الإحصائية مجموعات متنوعة من الأفراد أو الأشياء، مثل "جميع سكان بلد ما" أو "كل ذرة تُكوّن بلورة". كما يتناول الإحصاء جميع جوانب البيانات، بما في ذلك تخطيط جمع البيانات من خلال تصميم الاستبيانات والتجارب.

في السنوات الأخيرة، ازداد الوعي العام بشكل ملحوظ بموضوع الاحتمالات والإحصاء. حاليًا، تُقدّم جميع مقررات الرياضيات تقريبًا في المرحلة الثانوية بعض المواضيع الأساسية في الاحتمالات والإحصاء للعديد من الطلاب، بينما في الجامعة، تتطلب العديد من تخصصات العلوم الإنسانية، مثل الجغرافيا وعلم الاجتماع، معرفةً بأساسيات الاحتمالات والإحصاء من الطلاب الراغبين في الالتحاق بالجامعة. علاوة على ذلك، تُستخدم الاحتمالات والإحصاء بشكل متزايد في جميع التخصصات الأكاديمية تقريبًا. هناك عدد قليل نسبيًا من تخصصات العلوم أو العلوم الاجتماعية التي لا تتطلب معرفة الاحتمالات والإحصاء. سيتناول هذا الفصل بعض النظريات الأساسية المرتبطة بالاحتمالات و الإحصاء.

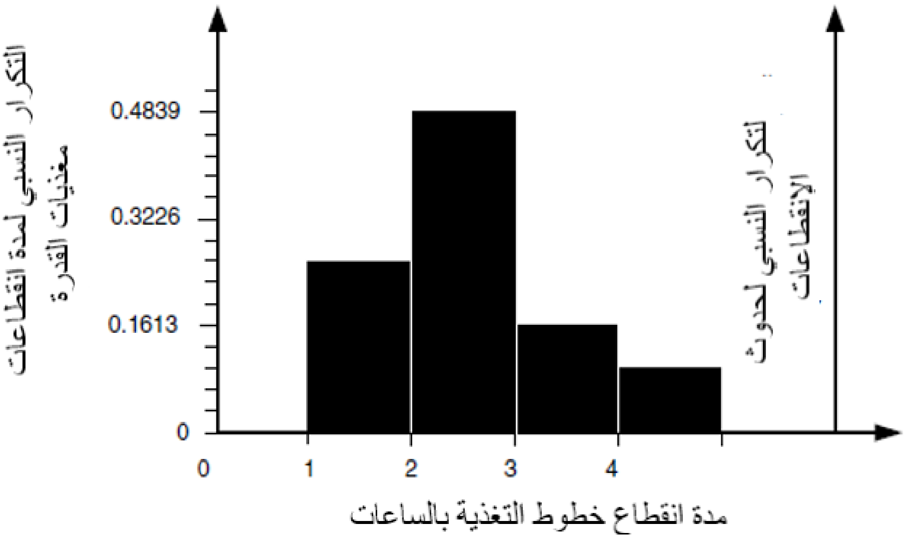
2-2 مفهوم التكرار

من الحقائق المعروفة أن الأشياء في الطبيعة تتسم بالتنوع. فالناس يختلفون في أطوالهم، وفي دخلهم، والآلات تُنتج أجزاءً ليست متطابقة تمامًا، والقائمة تطول. لتحليل البيانات، نقسمها إلى مجموعات، ونحسب عدد مرات الظهور في كل مجموعة. لنأخذ مثالين: في كيس من الكرات الزجاجية، توجد خمس كرات زرقاء، وسبع حمراء، وثلاث بيضاء؛ ثانيًا ، مدة انقطاع التيار الكهربائي عن محطة ثانوية معينة استمرت 8 مرات بين 0 و1 ساعة، و15 مرة بين 1 و2 ساعة، و5 مرات بين 2 و3 ساعات، و3 مرات بين 3 و4 ساعات، كما هو موضح في الشكل2-1.



الشكل 2-1 الرسم البياني لتكرار مدة انقطاعات التغذية.

في المثال الأول، تُصنَّف المجموعات بحسب خاصية نوعية، وهي لون الكرات . لدينا معلومات عن عدد الكرات من كل لون، ولكن هذا كل شيء. لا توجد علاقة بين المجموعات. أما المثال الثاني فهو مختلف. تُصنَّف المجموعات بحسب خاصية كمية، وهي مدة انقطاع التيار الكهربائي، وهناك علاقة كمية بين المجموعات. هذا النوع من التصنيف هو الذي يُسهِّل التحليل. تُسمى المجموعات فئات، ويُسمى العدد في كل مجموعة بالتكرار. يمكن أيضًا تحويل هذا التكرار إلى تكرار نسبي كنسبة مئوية من إجمالي السكان. يُسمى تصنيف مجموعة من العناصر حسب خاصية كمية توزيع التكرار.



الشكل 2-2 المدرج التكراري النسبي لمدد انقطاعات المغذيات.

2-2-1 مفهوم الفئة Class

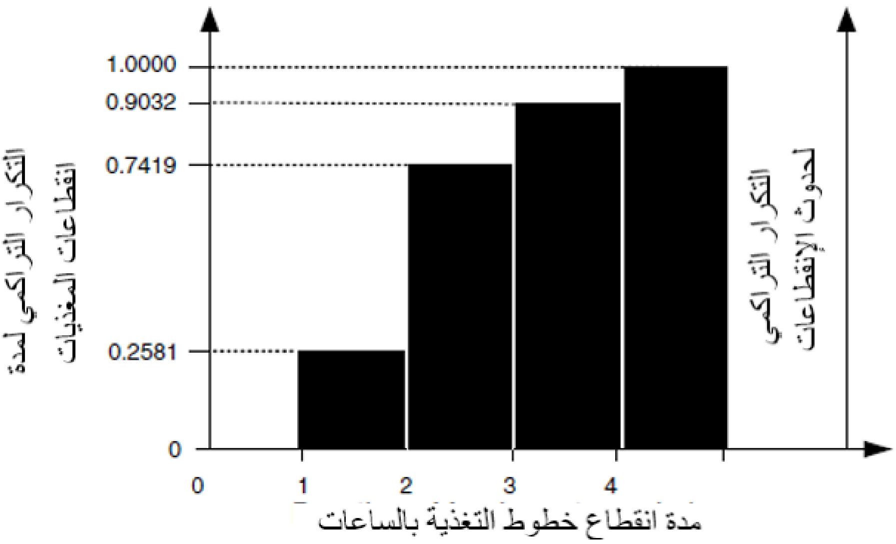
تبلغ مدة انقطاعات التغذية في مثال الفئات ساعة واحدة. يمكن تضييق هذه المدة للحصول على وصف أكثر تفصيلاً لمدتها، مما يؤدي إلى زيادة عدد الفئات. عمومًا، تكون الفئات متساوية في العرض ومتتالية. توجد أيضًا فئات تمثل أعدادًا منفصلة بدلًا من فترات، مثل أعمار الطلاب (مع تقريب العمر إلى أقرب عدد صحيح). طالما أن هذه الأعداد المنفصلة مرتبة بترتيب تسلسلي، فإنها تشكل توزيعًا تكراريًا يمكن تحليله بشكل منهجي.

2-2-2 الرسوم البيانية للتكرار

يمكن توضيح العلاقة بين التكرار أو التكرار النسبي والفئة بيانيًا كما هو موضح في الشكل 2.2. إذا عُرضت كرسم بياني عمودي، فهي مدرج تكراري. يمكن أيضًا استخدام المدرجات التكرارية للفئات المُعرَّفة نوعيًا. إذا تم توصيل نقاط منتصف الفئات المتتالية بخط، يصبح الرسم البياني خطيًا. في بعض الأحيان، يتم تنعيم الرسم البياني الخطي، فنحصل على توزيع تكراري تقريبي ومستمر. لا يكون للرسوم البيانية الخطية أي معنى إذا لم تكن الفئات مرتبطة كميًا.

2-2-3 نموذج التوزيع التكراري التراكمي

بدلاً من تكرار فئة معينة، يمكن عرض مجموع تكرارات جميع الإجراءات أو الفئات اللاحقة كما هو موضح في الشكل 2.3. للتوزيعات التكرارية التراكمية تطبيقات عديدة، منها منحنى مدة الحمل المستخدم في دراسات كفاية قدرة التوليد.



الشكل 2-3 الرسم البياني التكراري التراكمي لمدة انقطاعات التغذية.

2-3 المعايير المهمة لتوزيع التردد

الهدف الأساسي من إنشاء توزيع التردد هو تحليل نمط تغير ظاهرة ما. ويمكن تحديد هذا النمط من خلال عدة معايير.

2-3-1 المتوسط الحسابي (Mean)

يشير المتوسط الحسابي إلى المتوسط الحسابي أو القيمة المتوقعة. ويتم حسابه بجمع قيم جميع المشاهدات أو العناصر، ثم قسمة المجموع على العدد الإجمالي للمشاهدات أو العناصر. في معظم توزيعات التكرار، تقع القيم ضمن فئات مختلفة ويتم الجمع بحساب حاصل ضرب قيمة الفئة وتكرارها، ثم جمع النتائج على جميع الفئات. بعد ذلك، يُقسم هذا المجموع على التكرار الكلي. رياضيًا، إذا كانت x_i هي قيمة الفئة i، وf_i هو تكرار الفئة i، فإن

$$\text{المتوسط الحسابي} = Mean\ \bar{X} = \frac{\sum f_i\ x_i}{\sum f_i} \qquad (2.1)$$

يمثل المتوسط الحسابي القيمة المتوسطة لكل عنصر في توزيع التكرار هذا، مثل متوسط طول مجموعة من الطلاب في فصل دراسي، ومتوسط دخل الموظفين في شركة، وما إلى ذلك.

2-3-2 الوسيط Median

الوسيط هو قيمة العنصر الأوسط عندما تُرتّب جميع العناصر إما تصاعديًا أو تنازليًا. وهو يُمثّل نقطة المنتصف (50%) من الطيف؛ لذا يوجد عدد متساوٍ من العناصر على جانبي الوسيط.

2-3-3 المنوال Mode

المنوال هو القيمة الأكثر تكرارًا في توزيع التكرار، أي قيمة الفئة ذات التكرار الأعلى. وعند تمثيله بيانيًا، فهو قيمة الفئة المقابلة لأعلى نقطة في المنحنى.

2-3-4 الانحراف المعياري Standard Deviation

الانحراف المعياري هو مقياس لمدى التباين في التوزيع التكراري. يُعرَّف بأنه الجذر التربيعي لمتوسط مربعات الانحرافات في التوزيع التكراري. الانحراف هو الفرق بين قيمة عنصر ما والقيمة المتوسطة، وقد يكون سالبًا. مربع الانحراف هو مربع ذلك، وهو دائمًا موجب. يُحسب متوسط مربعات الانحرافات بجمع جميع مربعات الانحرافات في التوزيع التكراري وقسمتها على عدد العناصر. رياضيًا،

$$\text{Standard deviation} = \sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum f_i}}, \quad \text{where } \bar{x} \text{ is the mean} \qquad (2.2)$$

لذا، يُعدّ الانحراف المعياري مقياسًا لتشتت القيم حول المتوسط. على سبيل المثال، الأعداد الثلاثة 20 و25 و30 لها متوسط 25. يُعطي المتوسط تقريبًا جيدًا للأعداد الثلاثة. الأعداد 5 و10 و60 لها أيضًا متوسط 25، لكن المتوسط لا يُعطي مؤشرًا دقيقًا لقيم الأعداد الفردية. الانحراف المعياري هو ما يُوضح ذلك؛ في الحالة الأولى، هو 4.08، وفي الحالة الثانية، هو 24.83.

مثال2-1 :

يوضح الجدول التالي أقدمية 40 عاملاً في مصنع

رقم الأقدمية:

Seniority	1	2	3	4	5	6	8	9	11	15	18	20
Number	2	2	4	6	6	10	3	2	1	2	1	1

ما هو متوسط الأقدمية؟ ، وما هو الانحراف المعياري؟

الحل:

متوسط الأقدمية = $\bar{x} = \frac{\sum f_i x_i}{\sum f_i}$

$$= \frac{(2\times 1)+(2\times 2)+(4\times 3)+(6\times 4)+\cdots+(1\times 20)}{2+2+6+6+\cdots+1} = 6.33$$

الإنحراف المعياري = $\sigma = \sqrt{\frac{\sum f_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum f_i}}$

$$= \sqrt{\frac{2(1-6.33)^2+2(2-6.33)^2+4(3-6.33)^2+\cdots+1(18-6.33)^2+1(20-6.33)^2}{2+2+4+\cdots+1+1}} = 4.19$$

مثال2-2:

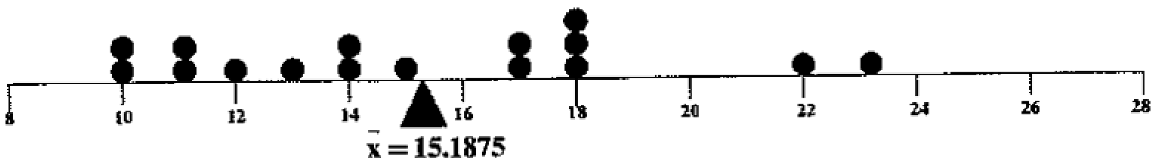
احسب متوسط البيانات التالية:

11	17	18	10	22	23	15	17
14	13	10	12	18	18	11	14

الحل :

المتوسط الحسابي هو

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots \dots . + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = \frac{11 + 17 + \cdots + 14}{16} = 15.1875$$



مثال 2-3 :

احسب الوسيط لمجموعة البيانات التالية:

11 17 18 10 22 23 15 17
14 13 10 12 18 18 11 14 21

الحل: هنا n = فردي = 17، وبالتالي الوسيط = 17 + 2/1 = الملاحظة من الرتبة التاسعة:

مصفوفة مرتبة:

10 10 11 11 12 13 14 14 **15** 17 17 18 18 18 21 22 23

مثال2-4:

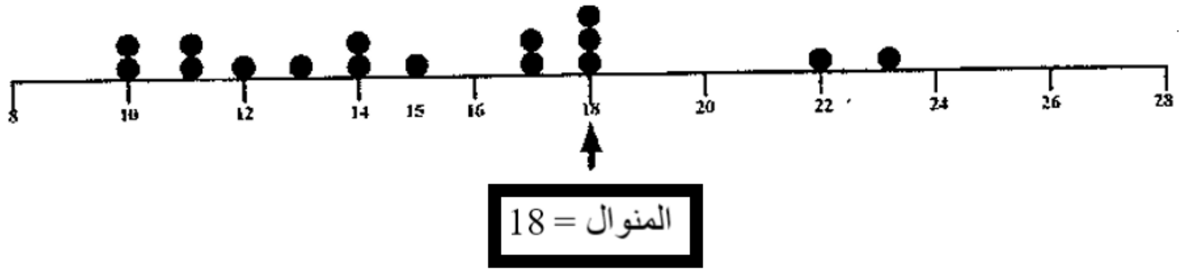
احسب المنوال لمجموعة البيانات التالية:

11 17 18 10 22 23 15 17
14 13 10 12 18 18 11 14 21

مصفوفة مرتبة:

10 10 11 11 12 13 14 14 15 17 17 **18 18 18** 21 22 23

نلاحظ أن القيمة 18 هي القيمة الأكثر تكرارًا، وبالتالي فإن المنوال = 18.



5-3-2 التباين Variance

التباين هو مربع الانحراف المعياري وله تطبيقات مباشرة أكثر في بعض التحليلات الإحصائية من الانحراف المعياري.

مما سبق يمكننا تسليط الضوء على تلك القوانين الإحصائية وتلخيصها كالتالي:

1. المتوسط الحسابي: هو مقياس لمركز البيانات. ويُحسب بجمع كل القيم من مجموعة بيانات ومن ثم قسمتها على عددها. مع العلم أن المتوسط يتأثر بالقيم المتطرفة. ويكون أفضل استخدام له في التوزيعات المتماثلة، مثال: إذا كان لدينا مجموعة من البيانات تمثل درجات طلاب في مادة الإحصاء لـ 12 طالباً. عندئذ يمكننا حساب المتوسط الحسابي لمعرفة المعدل العام للدرجات.

2. الوسيط: هو القيمة التي تتوسط مجموعة البيانات أي تقسم البيانات إلى قسمين متساويين. ويتم ايجاده عن طريق ترتيب البيانات تصاعدياً أو تنازلياً. وفي حال عدد البيانات فردي فإن القيمة المتوسطة لتلك البيانات هي الوسيط الحسابي. وفي حال كان العدد موجباً فإن الوسيط يحسب بأخذ المتوسط الحسابي للقيمتين الموجدتين في منتصف البيانات بعد ترتيبها. ويُستخدم عندما تكون البيانات غير متماثلة. مثال: إذا كان لدينا مجموعة من البيانات تمثل معدل دخل الأسر. فإنه يمكننا استخدام الوسيط لمعرفة القيمة الفاصلة بين الأسر الثرية ذات الدخل المرتفع والأسر الفقيرة ذات الدخل المنخفض.

3. المنوال: يمثل القيمة الأكثر تكرارًا في مجموعة البيانات. مع العلم انه قد تحتوي مجموعة البيانات على عدة قيم متكررة. وقد لا تحتوي أي قيم متكررة. ويُستخدم عندما تكون البيانات فئوية (جمال، 2022). مثال: إذا كان لدينا مجموعة من البيانات تمثل أنواع اللابتوبات. لذا يمكننا استخدام مقياس المنوال لمعرفة النوع الأكثر طلباً.

4. الانحراف المعياري: يعتبر أكثر مقاييس التشتت شيوعاً واستخداماً. وهو مقياس لتشتت البيانات حول المتوسط. كما يُستخدم لمعرفة مدى تباعد البيانات عن بعضها البعض. مثال: إذا كان لدينا مجموعة من القيم او البيانات التي تمثل درجات طلاب في مادة ما. يمكننا استخدام الانحراف المعياري لمعرفة مدى تباعد أو انتشار درجات الطلاب عن المتوسط.

5. التباين: هو مربع الانحراف المعياري. أي متوسط مربع الفرق بين قيم مجموعة البيانات عن الوسط الحسابي. ويعتبر مقياس لدرجة الانتشار في مجموعة البيانات. أي يُستخدم لمعرفة مدى تباعد تلك البيانات عن بعضها البعض بصورة أكثر دقة. مثال: إذا كان لدينا مجموعة من البيانات تمثل درجات طلاب في امتحان مادة الاحصاء. يمكننا استخدام التباين لمعرفة مدى تباعد درجات الطلاب عن المتوسط بشكل أكثر دقة من استخدام الانحراف المعياري.

6. المدى: وهو الفرق بين أصغر وأكبر قيمة في البيانات. ويتأثر بشكل كبير بالقيمة المتطرفة. علماً أنه لا يستخدم جميع القيم في مجموعة البيانات. مثال على المدى: اذا كان لدينا مجموعة البيانات (1،3،4،6،8)، يتم طرح أصغر قيمة في مجموعة البيانات من أكبر قيمة لنحصل على المدى ويساوي 8-1 = 7.

4-2 المفاهيم الأساسية لنظرية المجموعات Basic Concepts of Set Theory

1-4-2 المجموعات والعناصر *Sets and elements*

تعتبر نظرية المجموعات أساسًا للرياضيات الحديثة، وتُستخدم مفاهيم نظرية المجموعات في جميع الأوصاف الرسمية. المجموعة هي تجمع لأشياء تُسمى أعضاء أو عناصر تلك المجموعة. إذا كانت لدينا مجموعة، نقول إن بعض الأشياء تنتمي (أو لا تنتمي) إلى هذه المجموعة، أي أنها موجودة (أو غير موجودة) فيها. ونقول أيضًا إن المجموعات تتكون من عناصرها.

أمثلة: مجموعة الطلاب في هذه الغرفة؛ يمكن اعتبار الأبجدية الإنجليزية مجموعة حروف اللغة الإنجليزية؛ مجموعة الأعداد الطبيعية؛ إلخ.

يمكن أن تكون المجموعات منتهية أو غير منتهية.

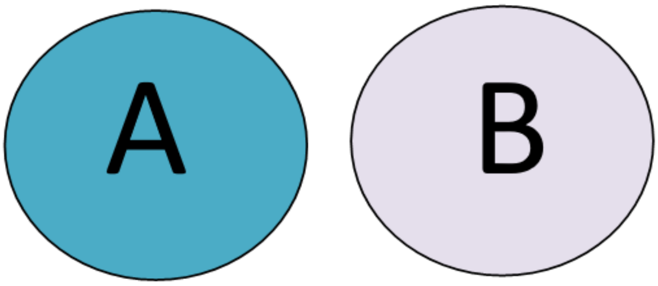
توجد مجموعة واحدة فقط، وهي المجموعة الفارغة أو المجموعة الخالية، التي لا تحتوي على أي عناصر على الإطلاق.

تُسمى المجموعة التي تحتوي على عنصر واحد فقط مجموعة أحادية أو مجموعة أحادية.

الرموز: A، B، C، ... للمجموعات ؛ a، b، c، ... أو x، y، z، ... للعناصر.

$b \in A$ إذا كان b ينتمي إلى A ($B \in A$ إذا كانت كل من A وB مجموعتين وكان B عنصرًا من A)

و$c \notin A$ إذا كان c لا ينتمي إلى A.

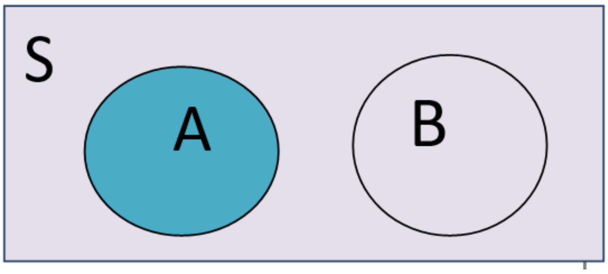


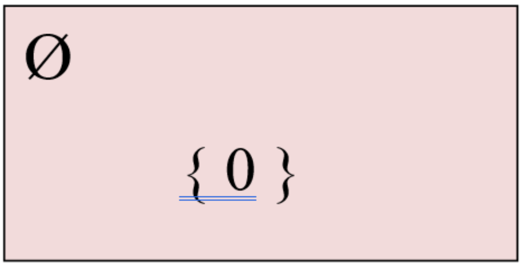
المجموعة A　　　　المجموعة B

فضاء العينة (S) والمجموعة الفارغة:

يُسمى أيضًا المجموعة الشاملة

يُستخدم الرمز Ø للمجموعة الفارغة. لذا، $\{0\} = Ø$.





المجموعة الشاملة　　　　المجموعة الفارغة (الخالية)

2-4-2 المجموعات الجزئية

تُسمى المجموعة A مجموعة جزئية من المجموعة B إذا كان كل عنصر من عناصر Aهو أيضًا عنصر من عناصرB. يُرمز إلى هذه العلاقة بين المجموعات بالرمز $A \subseteq B$. إذا كانت $A \subseteq B$ و $A \neq B$، فإننا نسمي A مجموعة جزئية فعلية من B ونكتب $A \subset B$. (تنبيه: أحيانًا يُستخدم الرمز ⊃ كما نستخدم الرمز ⊇).

يمكن نفي كلا الرمزين باستخدام الخط المائل / .

أمثلة 2-5:

$\{a,b\} \subseteq \{d,a,b,e\}$ و $\{a,b\} \subset \{d,a,b,e\}$.

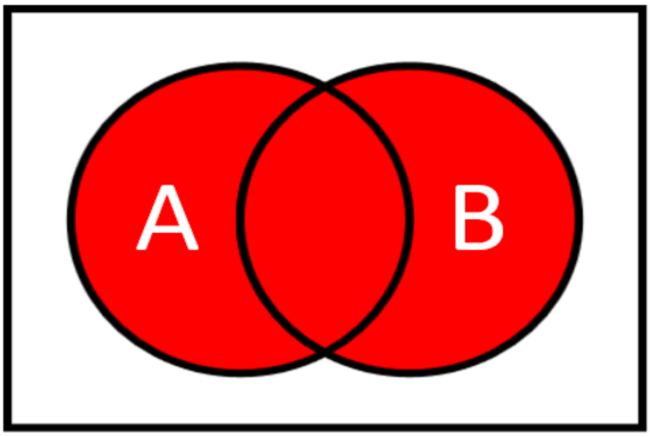
A و B مجموعتان جزئيتان من AUB

3-4-2 العمليات على المجموعات: الاتحاد، التقاطع

نُعرّف عدة عمليات على المجموعات. ليكن A و B مجموعتين اختياريتين.

- قانون اتحاد مجموعتان A وB، ويرمز له بـ A ∪ B، وهو المجموعة التي عناصرها تكون إما A أو B أو كليهما. ويُكتب تعريفها باستخدام صيغة المسند كما يلي:

$$A \cup B =_{\text{def}} \{\, x \mid x \in A \text{ or } x \in B \}$$



Union of two sets $A \cup B$ إتحاد مجموعتان

- قانون التبادل Commutative Law :

A ∪B =B ∪A (مثل a +b =b +a في الجبر العادي)

- قانون التجميع: Associative Law

A∪(B∪C) = (A∪B) ∪C (مثل a + (b + c) = (a + b) + c في الجبر العادي)

أمثلة 2-6 :

ليكن K = {a,b}، L = {c,d} و M = {b,d}، إذن

$$K \cup L = \{a,b,c,d\}$$

$$K \cup M = \{a,b,d\}$$

$$L \cup M = \{b,c,d\}$$

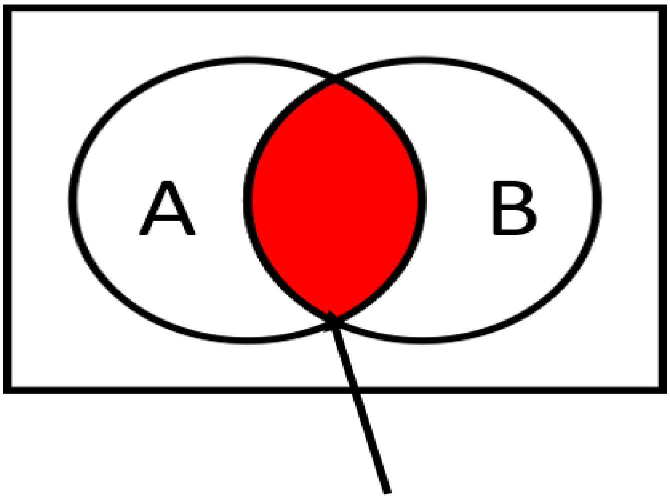
$$(K \cup L) \cup M = K \cup (L \cup M) = \{a,b,c,d\}$$

$$K \cup K = K$$

$$K \cup \emptyset = \emptyset \cup K = K = \{a,b\}.$$

- قانون تقاطع المجموعتين A و B، ويكتب A ∩ B، وهو المجموعة التي عناصرها هي نفسها عناصر المجموعتين A و B. وفي صيغة المسند، يكون التعريف كما يلي:

$$A \cap B =_{\text{def}} \{ x \mid x \in A \text{ and } x \in B\}$$



$A \cap B$

Intersection of two sets $A \cap B$ تقاطع مجموعتان

$$A \cap B = B \cap A$$

$$(A \cap B) \subseteq A$$

$$(A \cap B) \subseteq B$$

أمثلة 2-7 :

$$K \cap L = \emptyset$$

$$K \cap M = \{b\}$$

$$L \cap M = \{d\}$$

$$(K \cap L) \cap M = K \cap (L \cap M) = \emptyset$$

$$K \cap K = K$$

$$K \cap \emptyset = \emptyset \cap K = \emptyset .$$

2-4-4 عمليات إضافية على المجموعات: الفرق، والمتمم

عملية ثنائية أخرى على أي مجموعة هي الفرق " A ناقص B"، وتُكتب A- B، وهي عملية تُطرح فيها جميع العناصر الموجودة في Bمن A. [وتُسمى أيضًا المتمم النسبي: متمم Bبالنسبة إلىA]. يُعرّف ترميز المسند هذه العملية كما يلي:

$$A - B =_{\text{def}} \{ x \mid x \in A \text{ and } x \notin B\}$$

أمثلة: (باستخدام المجموعات K و L و M السابقة)

$$K - L = \{a,b\}$$

$$K - M = \{a\}$$

$$L - M = \{c\}$$

$$K - K = \emptyset$$

$$K - \emptyset = K$$

$$\emptyset - K = \emptyset .$$

2-4-5 معادلات نظرية المجموعات

هناك عدد من القوانين العامة المتعلقة بالمجموعات، والتي تنبثق من تعريفات عمليات نظرية المجموعات، والمجموعات الجزئية، وما إلى ذلك. يُعرض أدناه مجموعة مختارة من هذه القوانين، مُصنفة حسب مسمياتها التقليدية. تنطبق المعادلات التالية على أي مجموعات X، Y، Z:

1. *Idempotent Laws* القوانين المتكررة

(a) $X \cup X = X$ (b) $X \cap X = X$

2. *Commutative Laws* القوانين التبادلية

(a) $X \cup Y = Y \cup X$ (b) $X \cap Y = Y \cap X$

3. *Associative Laws* القوانين الترابطية

(a) $(X \cup Y) \cup Z = X \cup (Y \cup Z)$

(b) $(X \cap Y) \cap Z = X \cap (Y \cap Z)$

4. *Distributive Laws* قوانين التوزيع

(a) $X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$

(b) $X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$

In ordinary Algebra : في الجبر العادي:

(i) $a + (b \times c) \neq (a + b) \times (a + c)$

(ii) $a \times (b + c) = (a \times b) + (a \times c)$

5. *Identity Laws* قوانين الهوية

(a) $X \cup Ø = X$ (c) $X \cap Ø = Ø$

(b) $X \cup S = S$ (d) $X \cap S = X$

6. *Complement Laws :* القوانين المكملة

(a) $X \cup X' = S$ (c) $X \cap X' = Ø$

(b) $(X')' = X$ (d) $X - Y = X \cap Y'$

7. *DeMorgan's Laws :* قوانين ديمورغان

(a) $(X \cup Y)' = X' \cap Y'$ (b) $(X \cap Y)' = X' \cup Y'$

8. Consistency Principle: مبدأ الاتساق

(a) $X \subseteq Y$ if $X \cup Y = Y$ (b) $X \subseteq Y$ if $X \cap Y = X$

5-2 نظرية الاحتمالات Probability Theory

مفاهيم الاحتمالات:

الاحتمالات هي العلم الذي يتعامل مع عدم اليقين. وتُعرف أيضاً بمقياس الصدفة، أي فرصة وقوع حدث ما. وهي تُقدّم تعريفاً رياضياً للعشوائية.

أي أن الاحتمال، ببساطة، هو مقياس لمدى احتمالية وقوع حدث ما. عادةً ما يُستخدم أسلوب التكرار النسبي، أي عدد النتائج التي سيحدث فيها الحدث محل الاهتمام، معبراً عنها كنسبة مئوية أو عدد عشري من إجمالي عدد النتائج الممكنة، بافتراض ضمني أن جميع النتائج متساوية الاحتمال.

هناك نوعان من الحالات التي تُصادف عادةً في هذه الطريقة. الحالة الأولى هي عندما يكون عدد النتائج محدودًا، ويكون الاحتمال معروفًا بدقة، على سبيل المثال، احتمال الحصول على مجموع "ستة" في لعبة الطاولة التي تُستخدم فيها نردتان هو 36/5. الحالة الثانية هي عندما يكون عدد النتائج غير محدود،

مثل احتمال أن يكون يوم رأس السنة الصينية مشمسًا. العدد الإجمالي للنتائج هو جميع أيام رأس السنة الصينية منذ بداية العالم إلى الأبد، وهو عدد لا نهائي ويستحيل حصره، لذلك لا يمكن إلا تقدير الاحتمال من خلال بيانات محدودة من الماضي. إذا كان يوم رأس السنة الصينية مشمسًا في 8 سنوات من السنوات العشر الماضية، فسيُقدّر احتمال أن يكون يوم رأس السنة الصينية القادم مشمسًا بـ 0.8. لكن إذا استُخدمت سجلات السنوات الخمس والعشرين الماضية، فقد يُكتشف أن 22 عامًا منها شهدت يوم رأس السنة الصينية مشمسًا، مما يُعطي احتمالًا قدره 0.88. في هذا المثال، لا يوجد احتمال دقيق كما هو الحال بالنسبة لرمي النرد.

1-5-2 التعريفات:

• التجربة العشوائية الإحصائية: هي تجربة لا يمكن التنبؤ بنتائجها بدقة. أو هي سجل تجريبي لأي ظاهرة يكون تكرار حدوثها غير مؤكد.

• النتائج: هي نتيجة محددة للتجربة العشوائية، ويُرمز لها بأحرف صغيرة (a,b,c) أو (x,y,z)...

• فضاء العينة: جميع النتائج الممكنة لتجربة معينة. (يُرمز له بالحرف S).

• الحدث: نتيجة محددة أو مجموعة من النتائج؛ ويُرمز لها عادةً بأحرف كبيرة (A,B,C) أو (X,Y,Z).

يُعبّر عن احتمال وقوع حدث ما بمقياس من 0 إلى 1.

✓ 0 تعني أنه لن يحدث أبدًا.

✓ 1 تعني أنه سيحدث حتمًا.

لذا، تتراوح احتمالات وقوع الأحداث بين 0 (فشل) و1 (نجاح) باستثناء الحالات القصوى.

– احتمال النجاح = عدد حالات النجاح / عدد النتائج الممكنة؛ $p = s / (s+f)$

– احتمال الفشل = عدد حالات الفشل / عدد النتائج الممكنة؛ $q = f / (s+f)$

حيث: احتمال النجاح + احتمال الفشل = 1

$$p + q = 1$$

إن احتمال وقوع حدث ما هو عدد مرات وقوع حدث معين نسبةً إلى مجموع جميع الأحداث الممكنة. هذا هو التعريف الكلاسيكي للاحتمال.

مثال 2-8:

احتمال ظهور الرقم 3 عند رمي النرد هو 1 من 6، أو 6/1.

مثال 2-9:

عند رمي قطعة نقدية مرة واحدة، يمكن أن ينتج عنها إما صورة (H) أو كتابة (T)، أي 1 من 2، أو 2/1. هنا، S = {H,T}.

مثال 2-10:

احتمال ظهور صورة عند رمي عملتين معدنيتين مرة واحدة هو 1 من 4، أو 4/1.

• التكرار النسبي للحدث: هو عدد مرات وقوع حدث ما مقارنةً بجميع الأحداث الأخرى التي وقعت في التجربة.

• الحدث المؤكد: سيحدث هذا الحدث حتمًا أو بشكل مؤكد. (S = موجود).

• الحدث المستحيل (غير مؤكد): لا يمكن أن يقع هذا الحدث ($S = \varphi$).

• أحداث متنافية: حدثان أو أكثر لا يمكن أن يقعا معًا، على سبيل المثال: تبرئة شخص وسجنه، احتمال وقوعهما معًا يساوي صفرًا.

• الاحتمال الشرطي: احتمال وقوع الحدث (A) بشرط وقوع الحدث (B) بالفعل، على سبيل المثال: احتمال دخول السجن (A) بشرط وضع الجاني تحت المراقبة (B).

ويرمز إلى ذلك بـ $P(A|B)$

• الأحداث المستقلة: يعتبر الحدثان A و B مستقلين إذا كان الاحتمال الشرطي $P(A|B) = P(A)$، على سبيل المثال احتمال البراءة (A) بالنظر إلى أنها تمطر في الخارج (B).

2-5-2 ملاحظات حول نظرية الاحتمالات الأساسية

من الممكن دمج الأحداث لتكوين حدث جديد باستخدام عملية نظرية المجموعات.

1. قاعدة الجمع في الاحتمالات

- الحدث (AUB) هو حدث الاتحاد، ويُعرَّف بأنه الحدث الذي يقع إذا وقع A أو وقع B أو كلاهما.
- إذا لم يكن الحدثان متنافيين:

$$P(AUB) = P(A \text{ or } B) = P(A) + P(B) - P(A \text{ and } B)$$

مثال 2-11:

ما هو احتمال سحب ورقة جاك J أو ورقة قلب H من مجموعة أوراق لعب تم خلطها جيدًا؟

بما أن عدد أوراق اللعب هو 52 فان احتمال سحب جاك J هو 4 أوراق من 52 واحتمال سحب ورقة قلب H هو 13 من 52 لذا فان :

$$P(J \text{ or } H) = P(J) + P(H) - P(J \text{ and } H)$$

$$P(J \text{ or } H) = P(4/52) + P(13/52) - P(1/52)$$

$$P(J \text{ or } H) = (0.0769 + 0.2453) - (0.01923)$$

$$P(J \text{ or } H) = 0.3077$$

- إذا كان الحدثان متنافيين...أي متضادين فإن :

$$P(A \cup B) = P(A \cup B) = P(A) + P(B)$$

مثال2-12:

ما احتمال سحب ورقة جاك J أو ملك K ؟

$$P(J \text{ or } K) = P(J) + P(K)$$

$$P(J \text{ or } K) = P(4/52) + P(4/52)$$

$$P(J \text{ or } K) = (0.0769 + 0.0769) = 0.1538$$

3-5-2 قاعدة الضرب في الاحتمالات

الحدث (B∩A) هو حدث التقاطع، ويُعرَّف بأنه الحدث الذي يقع إذا وقع كل منA و B، أي احتمال وقوع A و B معًا.

- القاعدة العامة

$$P(A\cap B\ ) = P(A \text{ and } B) = P(B)\ P(A|\ B)$$

- إذا كانت الأحداث مستقلة عن بعضها البعض، فإن هذا يبسط الأمر

$$P\ (A\cap B) = P\ (A)\ P\ (B)$$

مثال 2-13:

يلعب أحمد وعليّ الورق، ما احتمال أن يسحب كلاهما ورقة آس القلوب؟

الحل: هذا احتمال مستقل

$$P\ (A \text{ and } B) = P\ (A\cap B) = P\ (A)\ P\ (B)$$

$$= (1/52) \text{ x } (1/52) = 0.0003698$$

هذا احتمال ضعيف للغاية.

مثال 3-14:

ما احتمال سحب ورقة جاك القلوب؟

بما أن جاك القلوب ليسا حدثين متنافيين، فهما بالتالي حدثان مستقلان...

$$P\ (J \text{ and } H) = P\ (J)\ P\ (H) = (4/52)\ (13/52) = 0.01923$$

لاحظ أن هذا هو نفسه

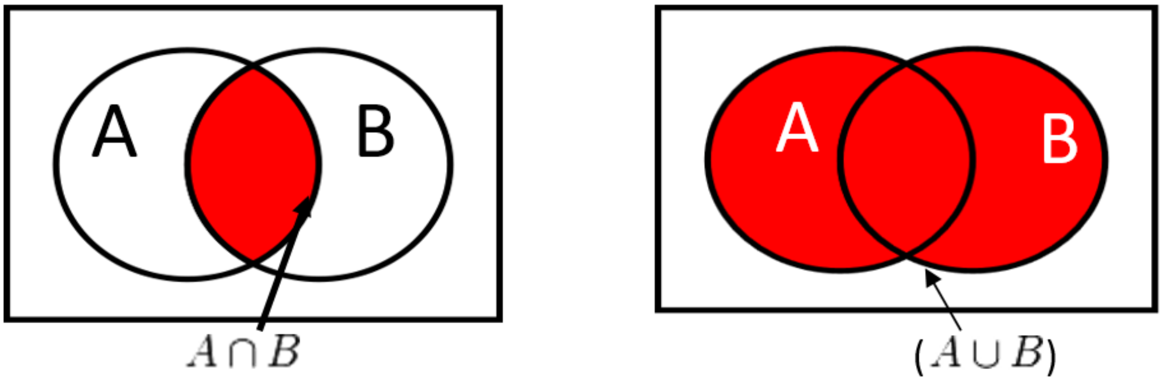
$$(1/52) = 0.01923$$

- الحدث ’A (مكمل A) هو الحدث الذي يحدث إذا لم يحدث A.

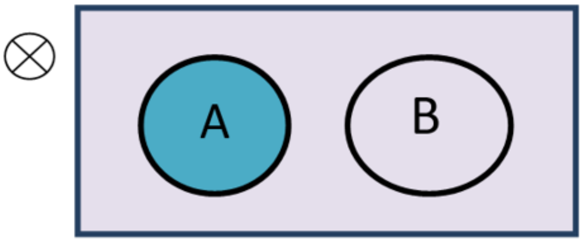
6-2 مخططات فين Venn diagram

يمكن استخدام مخطط فين لتوضيح احتمالات وقوع حدثين. ويمكن التعبير عن نظرية الاحتمالات رياضيًا من خلال نظرية المجموعات، حيث يُستخدم مخطط فين لشرح نظرية المجموعات بشكل تصويري.

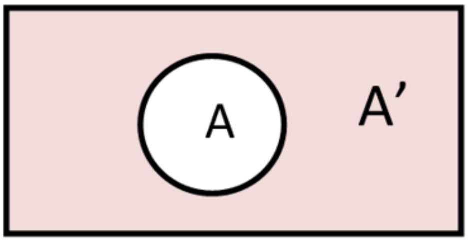
- يُرسم مخطط فين عادةً على شكل مستطيل يُمثل فضاء الاحتمالات الكلي S الذي يُحيط أو يُمثل كامل الفضاء قيد الدراسة.
- قد يوجد حدثان أو أكثر، مثل A وB، ضمن هذا الفضاء S الذي يجب جمع احتمالاته.
- الفضاء S الذي يجب جمع احتمالاته.



مخططات فين لتمثيل الاحتمالات



العنصران منفصلان Disjoint (غير مترابطان)



المتمم Complement

كما هو الحال في مخطط فين الأخير، فإن A وB منفصلان. وبالتالي، إذا لم يكن للمصفوفة ($A \cap B$) أي عناصر، فإن العنصرين A وB يُقال إنهما متنافيان. وهذا يعني أنه لا يمكن أن يظهر A وB في الوقت نفسه.

البديهيات:

1. إذا كان احتمال وقوع الحدث A يساوي 1، فإن A حدث مؤكد.

إذا كان احتمال وقوع الحدث A يساوي 0، فإن A حدث مستحيل.

2. بالنسبة للحدث A: 0 ≤ احتمال وقوع الحدث A ≤ 1 و $P(A)' = 1$ - احتمال وقوع الحدث A.

3. احتمال وقوع الحدث S يساوي 1 دائمًا.

4. بالنسبة لأي حدثين، كما في مخطط فين الثاني أعلاه،

$$P(AUB) = P(A) + P(B) - P(A \text{ and } B)$$

5. بالنسبة لحدثين A و B متنافيين:

$$P(AUB) = P(A) + P(B)$$

كذلك

$$P(A)' = 1 - P(A), \text{ and } \quad AUA' = S \quad, \text{ also: } P(A \cap B) = 0.$$

6. احتمال وقوع حدثين مستقلين معًا يساوي حاصل ضرب الاحتمالات الفردية.

$$P(A \cap B) = P(A) \ P(B)$$

7. قواعد الاحتمال الشرطي

إن احتمال وقوع الحدث A، بشرط وقوع الحدث B، يساوي احتمال وقوع الحدثين A وB معًا مقسومًا على احتمال وقوع الحدثB.

يُعرف هذا بالاحتمال الشرطي. ولا يُفترض استقلال الحدثين A وB. في الواقع، بإعادة ترتيب الحدود، نحصل على احتمال وقوع الحدثينA و B معًا عندما لا يكون الحدثان A وB مستقلين. وبالتالي،

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

أمثلة على الاحتمال الشرطي

مثال2-15 :

لنفترض أننا نراقب غطاءً سحابيًا في منطقة معينة ونتساءل عما إذا كان سيهطل المطر أم لا.

إذا رمزنا لحدث "هطول المطر" بالحدث A، ولحدث "وجود غطاء سحابي" بالحدث B، فإننا نهتم بمعرفة احتمال هطول المطر (أي الحدث A) بشرط وجود غطاء سحابي (أي الحدث B) فوق منطقة معينة. رياضيًا، يُعرَّف الاحتمال الشرطي لهطول المطر بشرط وجود غطاء سحابي على النحو التالي:

$$P(A|B)$$

حيث يُقرأ الخط العمودي (|) بين A وB على أنه "معطى".

لنفترض أننا لاحظنا أن 10% من الوقت يكون "ممطرًا" وتكون هناك غيوم، أو رياضيًا

$$P(A \cap B) = 0.10$$

لنفترض أننا لاحظنا أيضًا أن الغطاء السحابي يغطي الأرض بنسبة 40% من الوقت، أو رياضيًا

$$P(B) = 0.40$$

لذا، خلال فترة 100 يوم، ستكون السماء مغطاة بالغيوم لمدة 40 يومًا، وستهطل الأمطار مع وجود غيوم لمدة 10 أيام. تخيل احتمالات كل حدث كنسبة مئوية محددة من مجموعة بيانات معروفة (مثلاً، 100 يوم). في هذا المثال تحديدًا، المجموعة الفرعية المعروفة هي وجود غيوم (أي الحدثB) لمدة 40 يومًا، ونحن مهتمون بنسبة أو عدد الأيام التي ستشهد هطول أمطار (أي الحدثA) في حال وجود غيوم.

$$P(A|B) = \frac{\text{عدد الأيام الممطرة والمغطاة بالغيوم}}{\text{عدد الأيام التي يكون فيها غطاء من السحاب}} = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \times \frac{100}{100} = \frac{10}{40} = 0.25$$

لذلك، نستنتج أن المطر سيهطل بنسبة 25% من الوقت إذا كانت هناك غيوم.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

إن احتمال وقوع حدثين A و B في وقت واحد يساوي حاصل ضرب احتمال وقوع B والاحتمال الشرطي لوقوع A بشرط وقوع B.

أو أن احتمال وقوع الحدثين A $P(A \cap B) = P(B)P(A|B)$ حاصل ضرب احتمال A والاحتمال الشرطي لـ B بشرط وقوع A.

$$P(A \cap B) = P(A)P(B|A)$$

مثال 2-16:

جد احتمال سحب بطاقة صورة في السحبة الأولى، وبطاقة آس في السحبة الثانية في سحبتين متتاليتين بدون إرجاع.

الحل: هذا احتمال شرطي = P(A) P(B/A)

لنفترض أن:

احتمال سحب بطاقة صورة = احتمال سحب آس = 52/12

$$P\ (\text{face card}) = P\ (A) = 12/52$$

احتمال سحب آس = احتمال سحب بنس = 52/4

$$P\ (\text{ace}) = P\ (B) = 4/52$$

احتمال سحب آس/بطاقة صورة = احتمال سحب بنس/آس = 5/4

$$P\ (\text{ace / face card was drawn}) = P\ (B/A) = 4/51$$

$$P(A \cap B) = P(A)P(B|A) = (12/52) \times (4/51) = 4/221$$

مثال 2-17 :

لنفترض الآن أن 300 من الأولاد و100 من البنات مهتمون بألعاب الكمبيوتر. يوجد في المدرسة 400 طالب من أصل 800 يحبون ألعاب الكمبيوتر. مع ذلك، إذا تم اختيار طالب عشوائيًا، فإن احتمال العثور على ولد مهتم بألعاب الكمبيوتر يجب أن يكون 800/300 = 0.375 وفقًا للمبادئ الأساسية.

لا تنطبق قاعدة الضرب هنا لأن الحدثين، كون الطالب ولدًا واهتمامه بألعاب الكمبيوتر، ليسا مستقلين - يبدو أن الأولاد أكثر اهتمامًا بألعاب الكمبيوتر من البنات. بدلًا من ذلك، يجب استخدام الاحتمال الشرطي لنظرية 4. ولا يهم هنا أي حدث هو الحدث التابع وأي حدث هو الحدث المستقل. فستكون النتائج متطابقة.

(الطالب يحب العاب الحاسوب) إحتمال

(الطالب يحب العاب الحاسوب)إحتمال × ($\frac{\text{الطالب}}{\text{العاب الحاسوب}}$) احتمال =

أي أن :

$$
\begin{aligned}
P(\text{boy} \cap \text{likes computer games}) &= P(\text{boy}|\text{computer games}) \\
&\quad \times P(\text{likes computer games}) \\
&= 300/400 \times 400/800 \\
&= 0.375
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
P(\text{likes computer games} \cap \text{boy}) &= P(\text{likes computer games}|\text{boy}) \times P(\text{boy}) \\
&= 300/400 \times 400/800 \\
&= 0.375
\end{aligned}
$$

الفصل 3

التوزيعات في علم الإحصاء

1-3 مقدمة

في علم الإحصاء يُستخدم أسلوبان إحصائيان رئيسيان في تحليل البيانات: الإحصاء الوصفي، الذي يُلخص البيانات من عينة باستخدام مؤشرات مثل المتوسط أو الانحراف المعياري، والإحصاء الاستدلالي، الذي يستخلص النتائج من البيانات التي تخضع لتغيرات عشوائية (مثل أخطاء الرصد، وتغيرات المعاينة). يهتم الإحصاء الوصفي في أغلب الأحيان بمجموعتين من خصائص التوزيع (العينة أو المجتمع): النزعة المركزية (أو الموقع) التي تسعى إلى تحديد القيمة المركزية أو النموذجية للتوزيع، بينما يُحدد التشتت (أو التباين) مدى ابتعاد عناصر التوزيع عن مركزه وعن بعضها البعض. أما الاستدلالات التي تُجرى باستخدام الإحصاء الرياضي فتعتمد على إطار نظرية الاحتمالات، التي تُعنى بتحليل الظواهر العشوائية.

تُقسم التوزيعات في الإحصاء إلى توزيعات متصلة (للبينات الكمية المستمرة) ومنفصلة (للبينات المتقطعة/المعدودة)، وتعد أدوات أساسية لنمذجة البيانات وتحليل الاحتمالات. أبرزها التوزيع الطبيعي (شكل جرس)، التوزيع ذو الحدين (نجاح/ فشل)، توزيع بواسون (أحداث في زمن محدد)، والتوزيع الأسي (وقت الانتظار)، وتساعد هذه التوزيعات في اتخاذ القرارات القائمة على البيانات.

2-3 أنواع التوزيعات المبنية على نظرية الإحتمالات

أولاً: التوزيعات الاحتمالية المتصلة (Continuous Distributions)

تستخدم للمتغيرات التي يمكن أن تأخذ أي قيمة في مدى معين (مثل الطول، الوزن، الوقت) وأهمها :

- التوزيع الطبيعي (Normal Distribution): يسمى أيضاً بتوزيع جاوس، وهو الأكثر شيوعاً، ويتميز بتماثله حول قيمة المتوسط، حيث يكون المتوسط = الوسيط = المنوال.
- التوزيع الأسي (Exponential Distribution): يستخدم لنمذجة الوقت حتى وقوع حدث معين، مثل وقت الوصول في قائمة الانتظار.
- توزيع جاما (Gamma Distribution): يستخدم غالباً في تحليل أوقات الانتظار أو المدد الزمنية لإنجاز المشاريع.

- توزيع بيتا (Beta Distribution): يستخدم لنمذجة الاحتمالات والنسب، مثل التنبؤ بنجاح حملة إعلانية معينة.

ثانياً: التوزيعات الاحتمالية المنفصلة (Discrete Distributions)

تستخدم للمتغيرات التي تأخذ قيماً صحيحة محددة (مثل عدد الأشخاص، عدد القطع المعيبة) وأهمها :

- توزيع ذي الحدين (Binomial Distribution): يحدد احتمال عدد معين من النجاحات في عدد ثابت من التجارب (مثل ناجح/ فاشل).
- توزيع بواسون (Poisson Distribution): يستخدم لحساب عدد الأحداث التي تحدث في فترة زمنية أو مكان محدد.
- التوزيع الهندسي (Geometric Distribution): يحدد عدد المحاولات حتى الحصول على النجاح الأول.
- توزيع برنوللي (Bernoulli Distribution): وهو حالة خاصة من التوزيع ذو الحدين. يصف احتمالية حدوث حدثين فقط لتجربة واحدة ويكون ذا نتيجتين محتملتين (نجاح أو فشل).

ثالثاً: توزيعات أخرى

- التوزيع المنتظم (Uniform Distribution): تكون فيه جميع النتائج المحتملة لها نفس الاحتمال.
- توزيع كوشي (Cauchy Distribution): مثال على توزيع ليس لديه قيمة متوقعة أو تباين، ويستخدم في الفيزياء.

بناء على ما ورد في أعلاه فان التوزيع الأسي(Exponential Distribution) يعد أحد التوزيعات الإحصائية التي تستخدم لقياس الوقت بين الأحداث في التوزيع الزمني المستمر .يتميز هذا التوزيع بأن احتمال حدوث الحدث ثابت بمرور الوقت . لذا يستخدم في تحليل عمر المنتجات أو الفترات الزمنية بين الحوادث مثل الأعطال الميكانيكية والأجهزة والمعدات الكهربائية وحساب وثوقيتها. كما تساعد معرفة هذه التوزيعات المذكورة في تحليل البيانات بدقة، وتعزيز النماذج الإحصائية، واتخاذ قرارات مبنية على البيانات في مجالات عدة كالتسويق والذكاء الصناعي.

3-3 نماذج توزيع الاحتمالات

1-3-3 المتغير العشوائي Random Variable

المتغير العشوائي (يسمى أيضًا الكمية العشوائية أو المتغير الاحتمالي أو المتغير العشوائي) هو صياغة رياضية لكمية أو مكون يعتمد على أحداث عشوائية. ولا يشير مصطلح "المتغير العشوائي" في تعريفه الرياضي إلى العشوائية أو التباين، بل هو دالة رياضية يكون فيها: المجال هو مجموعة النتائج الممكنة في فضاء العينة (مثل المجموعة {H, T}، وهي الوجهان العلويان المحتملان لرمي قطعة نقدية : صورة H أو كتابة T). والمدى هو فضاء قابل للقياس (مثلاً، بالنسبة للمجال أعلاه، قد يكون المدى هو المجموعة {-1,1}، إذا كانت الصورة H تُقابل -1 والكتابة T تُقابل 1). عادةً، يكون مدى المتغير العشوائي مجموعة جزئية من الأعداد الحقيقية. تتضمن معظم مسائل الاحتمالات والإحصاء عددًا يمكن أن يتغير ضمن نطاق من القيم. هذا العدد هو قيمة العنصر قيد الدراسة، ويتم تحديده بواسطة عملية عشوائية، ومن هنا جاء اسمه المتغير العشوائي. ويمكن للمتغير العشوائي أن يأخذ أي قيمة ضمن النطاق أو المدى ، لكن احتمال أن يأخذ قيمة معينة يختلف باختلاف القيمة التي يأخذها.

بصورة غير رسمية، يُمثل العشوائية عادةً عنصرًا أساسيًا من عناصر الصدفة، كما هو الحال في رمي قطعة النرد؛ وقد يُمثل أيضًا عدم اليقين، مثل خطأ القياس. ومع ذلك، فإن تفسير الاحتمالية معقد فلسفيًا، وحتى في الحالات الخاصة، ليس دائمًا واضحًا. أما التحليل الرياضي البحت للمتغيرات العشوائية فهو مستقل عن هذه الصعوبات التفسيرية، ويمكن أن يستند إلى إطار بديهي صارم.

في لغة نظرية القياس الرياضية الرسمية، يُعرَّف المتغير العشوائي بأنه دالة قابلة للقياس من فضاء قياس احتمالي (يُسمى فضاء العينة) إلى فضاء قابل للقياس. وهذا يسمح بدراسة القياس الأمامي، الذي يُسمى توزيع المتغير العشوائي؛ وبالتالي، فإن التوزيع هو قياس احتمالي على مجموعة جميع القيم الممكنة للمتغير العشوائي. من الممكن أن يكون لمتغيرين عشوائيين توزيعات متطابقة ولكنهما يختلفان اختلافًا جوهريًا؛ على سبيل المثال، قد يكونان مستقلين.

من الشائع دراسة الحالات الخاصة للمتغيرات العشوائية المتقطعة والمتغيرات العشوائية المتصلة تمامًا، وذلك بحسب ما إذا كانت قيمة المتغير العشوائي تقع ضمن مجموعة جزئية قابلة للعد أو ضمن مجال من الأعداد الحقيقية. توجد احتمالات أخرى مهمة، خاصة في نظرية العمليات العشوائية، حيث من الطبيعي دراسة المتتاليات العشوائية أو الدوال العشوائية. أحيانًا يُفترض أن قيمة المتغير العشوائي تقع تلقائيًا ضمن الأعداد الحقيقية، وتُسمى الكميات العشوائية الأكثر عمومية بالعناصر العشوائية. المتغير العشوائي هو نتيجة أو تحقق معين لمتغير عشوائي.

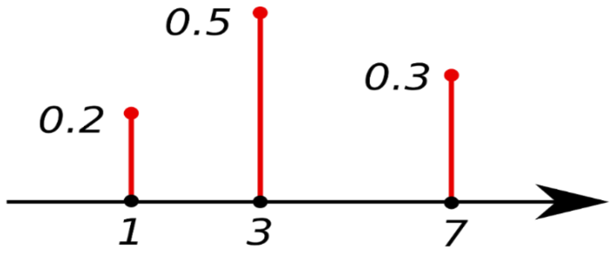
التعريف

المتغير العشوائي X هو دالة قابلة للقياس $X: \Omega \to E$ من فضاء العينة Ω كمجموعة من النتائج الممكنة إلى فضاء قابل للقياس E. و لكي يكون قياس X معبرًا عنه، يجب أن ينتمي فضاء العينة Ω إلى ثلاثية احتمالية (Ω,F,P) (انظر التعريف النظري للقياس)*. يُرمز عادةً للمتغير العشوائي بأحرف رومانية كبيرة مثل: X, Y, Z, T . ويُكتب احتمال أن تأخذ X قيمةً في مجموعة S ⊇ E قابلة للقياس على النحو التالي:

$$\mathrm{P}(X \in S) = \mathrm{P}(\{\omega \in \Omega \mid X(\omega) \in S\})$$

الحالة القياسية

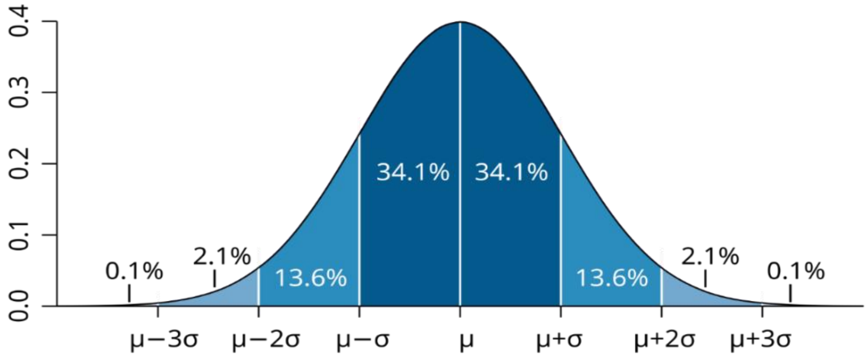
في كثير من الحالات، X متغير حقيقي القيمة، أي $E = \mathbb{R}$. في بعض السياقات، يُستخدم مصطلح العنصر العشوائي للدلالة على متغير عشوائي ليس من هذا الشكل فعندما تكون X صورة (أو مدى محدودة أو غير محدودة قابلة للعد، يُسمى المتغير العشوائي متغيرًا عشوائيًا منفصلاً **Discrete random variable** ، الشكل 3-1، ويكون توزيعه توزيعًا احتماليًا منفصلاً، أي يمكن وصفه بدالة كتلة احتمالية تُسند احتمالًا لكل قيمة في صورة. وإذا كانت الصورة غير محدودة قابلة للعد (عادةً ما تكون فترة)، يُسمى X متغيرًا عشوائيًا مستمراً أو متصلاً **Continuous random variable** ، ألشكل 3-2 . وفي الحالة الخاصة التي يكون فيها المتغير العشوائي متصلاً اتصالاً مطلقاً، يمكن وصف توزيعه بدالة كثافة احتمالية، تُحدد احتمالات للفترات؛ وعلى وجه الخصوص، يجب أن يكون لكل نقطة احتمال صفر بالضرورة بالنسبة للمتغير العشوائي المتصل اتصالاً مطلقاً. والجدير بالذكر أنه ليست كل المتغيرات العشوائية المتصلة متصلة اتصالاً مطلقاً.



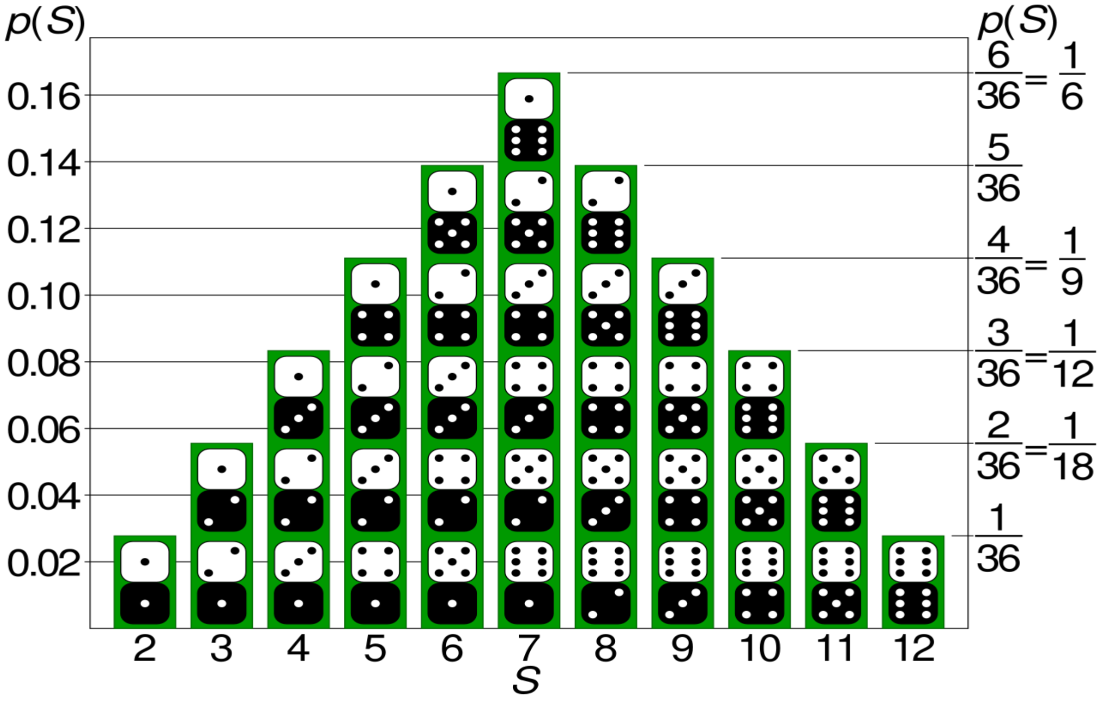
الشكل 3-1 المتغير العشوائي المنفصل (المتقطع) **Discrete random variable** .

*في الرياضيات، يُعدّ مفهوم القياس تعميمًا وصياغةً رسميةً للقياسات الهندسية (الطول، المساحة، الحجم) ومفاهيم شائعة أخرى، مثل المقدار والكتلة واحتمالية وقوع الأحداث. تتشابه هذه المفاهيم، التي تبدو متباينة، في كثير من الجوانب، ويمكن غالبًا تناولها معًا في سياق رياضي واحد. تُعتبر القياسات أساسية في نظرية الاحتمالات ونظرية التكامل، ويمكن تعميمها لتشمل القيم السالبة، كما هو الحال مع الشحنة الكهربائية. وتُستخدم تعميمات واسعة النطاق للقياس (مثل القياسات الطيفية والقياسات ذات القيم الموجبة للمؤثرات) على نطاق واسع في فيزياء الكم والفيزياء عمومًا.

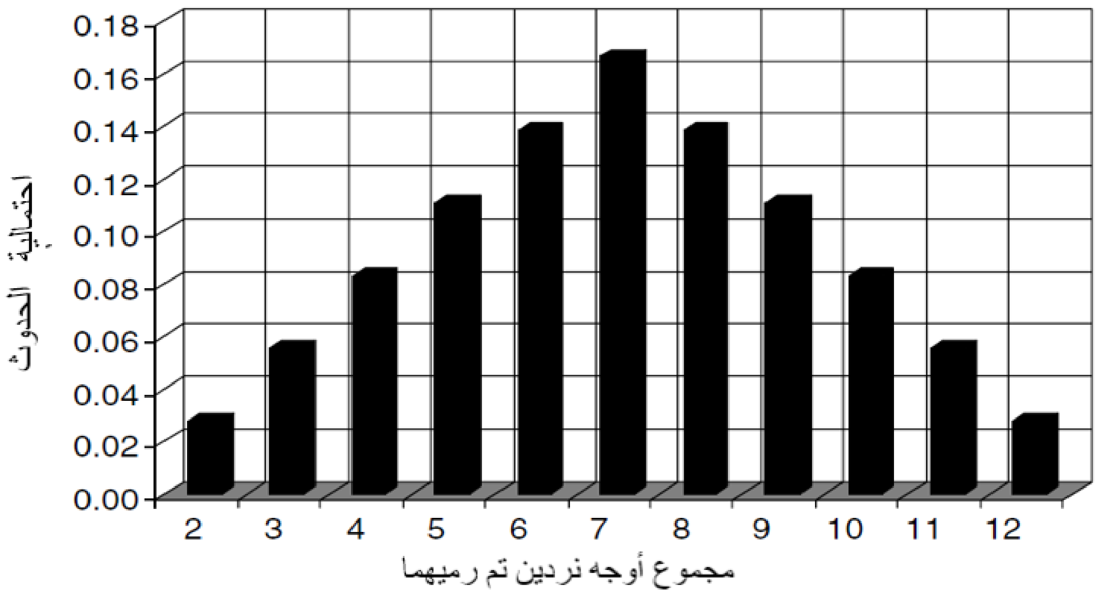
بالعودة إلى مثال لعبة الطاولة، فإن احتمالات رمي النرد تتراوح من "اثنان" إلى "اثنا عشر"، لكن احتمال كل رمية ليس هو نفسه الموضح في الشكل 3-3 إذا تم رسم الاحتمال مقابل الرمية، فسيتم الحصول على الرسم البياني الموضح في الشكل3-4 . يُطلق على هذا الرسم البياني اسم توزيع احتمالي. هذا التوزيع الاحتمالي هو توزيع منفصل لأن قيم الرميات لا يمكن أن تكون إلا أعدادًا صحيحة. إذا كان المتغير العشوائي متصلًا ويمكن أن يأخذ أي قيمة ضمن النطاق، فسيكون توزيعًا احتماليًا متصلًا .



الشكل 3-2 المتغير العشوائي المتصل Continuous random variables.



الشكل 3-3 مجموع وجهي النرد لرمية واحدة كدالة لقيمة وجه النرد رقم 2.



الشكل 3-4 التوزيع الاحتمالي لمجموع أوجه نردين تم رميهما.

3-3-2 دالة كثافة الاحتمال Probability density function

في التوزيع الاحتمالي المتقطع، يمثل المحور الرأسي للمتغير العشوائي احتمالية أن يأخذ المتغير العشوائي تلك القيمة المحددة، على سبيل المثال، ارتفاع الشريط عند رمي النرد "سبعة" في الشكل 3-4 هو 0.16 (أو السدس في الشكل 3-3)، وهو احتمالية رمي النرد "سبعة". مجموع ارتفاعات جميع الأشرطة يساوي 1. يواجه هذا التمثيل صعوبة مع التوزيعات الاحتمالية المستمرة. وبما أن المتغير العشوائي يمكن أن يأخذ عددًا لا نهائيًا من القيم الممكنة، فإن مجموع كل هذه الاحتمالات سيصل إلى ما لا نهاية. والحل لهذه المشكلة هو استخدام دالة كثافة الاحتمال.

في دالة كثافة الاحتمال، يمثل المحور الرأسي للمتغير العشوائي x كثافة الاحتمال وليس الاحتمال نفسه. ويُعبَّر عن الاحتمال بالمساحة تحت المنحنى، لذا فإن احتمال وقوع x بين A و B هو المساحة تحت المنحنى بين $x = A$ و $x = B$، واحتمال أن يكون المتغير العشوائي مساويًا لقيمة معينة بالضبط يساوي صفرًا لأن مساحة الخط تساوي صفرًا. المساحة تحت المنحنى بأكمله تساوي 1. ويمكن عادةً تمثيل دالة كثافة الاحتمال بتعبير رياضي، على سبيل المثال،

$$f(x) = \frac{1}{a} e^{-x/a}$$

يمكن إيجاد المساحة تحت المنحنى من النقطةA إلى النقطةB عن طريق التكامل كما يأتي :

إحتمالية

$$(A < x < B) = \int_A^B f(x)\, dx$$

لأغراض التطبيق، توجد جداول لحساب المساحة تحت المنحنى طالما أن حدود النهاية معروفة.

بالنسبة لتوزيعات الاحتمال المنفصلة، لا توجد منحنيات متصلة، بل أشرطة فقط عند القيم المنفصلة التي قد يأخذها المتغير العشوائي. ارتفاعات الأشرطة هي الاحتمالات المقابلة، ولا حاجة للتكامل. ولتحديد الاحتمالات التراكمية ، يتطلب الأمر حساب ارتفاعات الأشرطة بشكل منفصل وجمعها، بينما مع دالة كثافة الاحتمال المتصلة، كل ما يلزم هو التكامل بين الحدود المناسبة. بالنسبة لتوزيعات الاحتمال المنفصلة الشائعة، توجد جداول قياسية للاحتمالات التراكمية.

3-3-3 معلمات التوزيعات الاحتمالية

متوسط التوزيع الاحتمالي هو القيمة المتوسطة للمتغير العشوائي. وهو مماثل لمتوسط التوزيع التكراري. بالنسبة للتوزيع المتقطع، ويُعطى متوسط قيمة المتغير العشوائي بالصيغة التالية:

$$\bar{x} = \sum P(x_i) x_i$$

بالنسبة لتوزيع احتمالي مستمر،

$$\bar{x} = \int x \cdot f(x)\, dx$$

لا يقع المتوسط بالضرورة في منتصف نطاق قيم x الممكنة. مع ذلك، هناك احتمال متساوٍ لوقوع المتغير العشوائي x في الجانب الأدنى من نطاق x كما هو الحال في الجانب الأعلى. في التوزيع الاحتمالي المستمر، هذا يعني أن المساحة تحت المنحنى تنقسم إلى نصفين متساويين عند $x = \bar{x}$.

في هذا الفصل ، سنقتصر على دراسة التوزيعات : ذات الحدين، وبواسون، والأسية لكونها لها علاقة وطيدة بتقييم وثوقية مكونات منظومات القدرة الكهربائية .

4-3 التوزيع ذو الحدين binomial distribution

في نظرية الاحتمالات والإحصاء، يُعرف التوزيع ذو الحدين بمعاملات n و p بأنه التوزيع الاحتمالي المنفصل لعدد النجاحات في سلسلة عدد من n تجربة مستقلة، تطرح كل منها سؤالًا إجابته نعم أو لا، ولكل منها نتيجة منطقية خاصة بها: نجاح (باحتمال p) أو فشل (باحتمال $q = 1 - p$). تُسمى تجربة النجاح أو

الفشل الواحدة أيضًا بتجربة برنولي، وتُسمى سلسلة النتائج عملية برنولي. في التجربة الواحدة، أي عندما n = 1، ويكون التوزيع ذو الحدين هو توزيع برنولي. يُعد التوزيع ذو الحدين أساس اختبار الدلالة الإحصائية ذي الحدين.

يُستخدم التوزيع ذو الحدين بشكل متكرر لنمذجة عدد النجاحات في عينة حجمها n مسحوبة مع الإحلال من مجتمع حجمه N. إذا تم إجراء السحب بدون إحلال (تعويض)، فإن السحوبات لا تكون مستقلة، وبالتالي يكون التوزيع الناتج توزيعًا فوق هندسي، وليس توزيعًا ذو حدين. ومع ذلك، بالنسبة لـ N الأكبر بكثير من n، يظل التوزيع ذو الحدين تقريبًا جيدًا، ويستخدم على نطاق واسع. وسنوضح مثالاً لهذا التوزيع الاحتمالي بوضوحٍ تام : لنفترض احتمالية رمي نرد متوازن والحصول على الرقم "ستة" مرتين من أصل ثلاث رميات. لنبدأ من المبدأ الأساسي:

- احتمال الحصول على الرقم "6" عند رمي النرد هو 6/1
- احتمال عدم الحصول على الرقم "6" عند رمي النرد هو 6/5

للحصول على مجموع "ستة" مرتين من ثلاث رميات، هناك ثلاث طرق:

6 6 X، الاحتمال = 6/1 × 1/ 6 × 6/5 = 216/5

6 X 6، الاحتمال = 6/1 × 6/5 × 6/1 = 216/5

X 6 6، الاحتمال = 6/5 × 1/ 6 × 6/1 = 216/5

احتمالات التسلسلات الثلاثة متساوية. يتكون كل تسلسل من:

احتمال الحصول على الرقم "ستة" مرفوعًا للأس 2 (عدد مرات الحصول على الرقم "ستة") مضروبًا في احتمال عدم الحصول على الرقم "ستة" مرفوعًا للأس 1 (عدد مرات الحصول على الرقم "ستة" الأرقام غير "ستة" المطلوبة). عدد التسلسلات هو عدد التوليفات الممكنة لعنصرين من أصل ثلاثة. بضرب الحدود الثلاثة معًا، نحصل على الاحتمال المطلوب. الاحتمال الكلي = 3 × (6/1) × $(6/5)^2$ = $7^2/5$.

يمكن تعميم هذه العملية باستخدام نظرية ذات الحدين على النحو التالي:

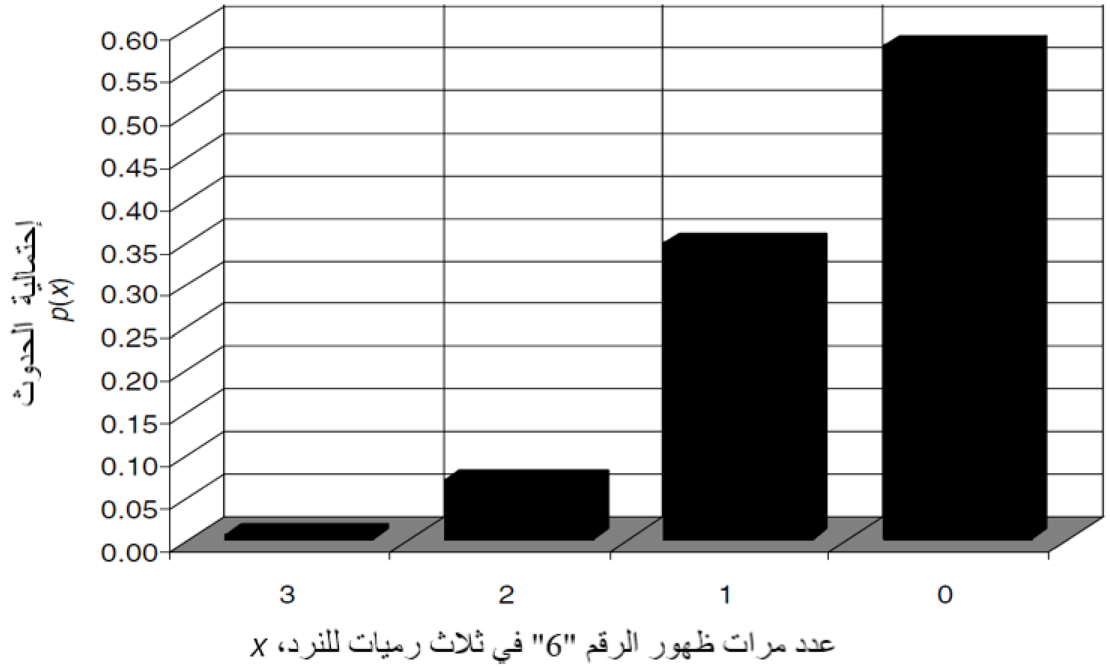
$$P(x) = nC_x p^x (1-p)^{n-x}$$

حيث n هو عدد المحاولات ، و x هو عدد المحاولات الناجحة المطلوبة، و $nC_x = n!/((n - x)!x!)$ هو عدد التوليفات الممكنة لـ x عنصر من أصل n، و P هو احتمالية النجاح.

يمكن التعرف على هذا الحد بسهولة باعتباره الحد P^x في مفكوك الحد ذي الحدين $[P+(1-P)]^n$. في المثال أعلاه،

$$(1/6+5/6)^3 = (1/6)^3 + 3(1/6)^2(5/6) + 3(1/6)(5/6)^2 + (5/6)^3$$

ليس هذا من قبيل الصدفة. في الواقع، يُمثل الحد الأول احتمال الحصول على ثلاثة أرقام ست، والحد الثاني احتمال الحصول على رقمين ست ورقم آخر، والحد الثالث احتمال الحصول على رقم ست ورقمين آخرين، والحد الرابع احتمال الحصول على ثلاثة أرقام أخرى. وبما أن هذا يشمل جميع الاحتمالات، فإن مجموع هذه الاحتمالات يجب أن يساوي 1. وهذا صحيح تلقائيًا لأن $[P+(1-P)]^n$ يساوي دائمًا واحد 1 بغض النظر عن قيمتي P و n. والرسم البياني لـ $P(x)$ مقابل x لجميع الحدود n هو توزيع احتمالي ذو حدين، كما هو موضح في الشكل 3-5.



الشكل 3-5 توزيع الاحتمال ذي الحدين n=3، p=1/6.

هنا، يُمثل n و P معلمات التوزيع التي تُحدد شكل التوزيع ذي الحدين. أما متوسط التوزيع فهو :

$$\sum P(x_i)x_i = p$$

والانحراف المعياري : $\sigma = \sqrt{p(1-p)}$

إن حساب حدود التوزيع ذي الحدين ليس صعبًا جدًا باستخدام الآلة الحاسبة. قد تكون حسابات الاحتمال التراكمي مملة، ولكن توجد جداول متاحة. أيضًا، بالنسبة لقيم n الكبيرة، يمكن تقريب التوزيعات ذات الحدين بتوزيعات أخرى.

مثال 3-1 :

من المعروف أن 5% من العوازل معيبة. ما احتمال وجود ثلاثة عوازل معيبة أو أكثر في سلسلة من خمسة عوازل؟

الحل:

معدل العيوب p = 0.2.

احتمال وجود ثلاثة عوازل معيبة أو أكثر في خمسة عوازل يُعطى بالعلاقة التالية:

$$P(x) = nC_x p^x (1-p)^{n-x} \qquad \text{(الفقرة 3- 5)}$$

$$\begin{aligned} P(3) &= 5C_3(0.2)^3(0.8)^{5-3} \\ &= \frac{5\times4\times3\times2\times1}{(3\times2\times1)\times(2\times1)}(0.2)^3(0.8)^2 \\ &= 0.0011 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(4) &= 5C_4(0.2)^4(0.9)^{5-4} \\ &= 5(0.2)4\times(0.8) \\ &= 0.0064 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(5) &= 5C_5(0.2)^5(0.8)^0 \\ &= 0.00032 \end{aligned}$$

احتمال وجود ثلاثة عوازل معيوبة أو أكثر:

$$\begin{aligned} &= P(3)+P(4)+P(5) \\ &= 0.00782 \\ &= 0.782\% \end{aligned}$$

مثال 2-3 :

إذا كان هناك ثلاثة عوازل سليمة في سلسلة من أربعة عوازل، لخط فولتية 66 كيلوفولت، فإن احتمال حدوث وميض كهربائي يكون صغيرًا جدًا (0.02%). في خط فولتية 66 كيلوفولت، تُستخدم عوازل مُستصلحة بنسبة 10% من العوازل المعيبة. ما هواحتمال أن تحتوي السلسلة على أقل من ثلاثة عوازل سليمة؟ قرر مدير الهندسة إضافة وحدة واحدة إلى كل سلسلة. كيف يُساعد ذلك؟

الحل:

إذا كانت نسبة العوازل المعيبة 10%، فإن احتمالات الحصول على صفر أو عازل سليم واحد أو عازلين سليمين في سلسلة من خمسة عوازل هي

$$P(0) = {}_4C_0(0.8)^0(0.2)^4 = (0.2)^4 = 0.0016$$

$$P(1) = {}_4C_1(0.8)^1(0.2)^3 = 4 \times 0.8 \times 0.008 = 0.0256$$

$$P(2) = {}_4C_2(0.8)^2(0.2)^2 = 0.1536$$

$$P(0) + P(1) + P(2) = 0.0016 + 0.0256 + 0.1536 = 0.1808 = 18.08\%$$

إذا زاد طول السلسلة إلى 5،

$$P(0) = {}_5C_0(0.8)^0(0.2)^5 = 0.00032$$
$$P(1) = {}_5C_1(0.8)^1(0.2)^4 = 0.0064$$
$$P(2) = {}_5C_2(0.8)^2(0.2)^3 = 0.0512$$

تعريفات وصيغ أخري لتوزيع ذي الحدين (دالة الكتلة الاحتمالية)

لعدد طبيعي $n \in \mathbb{N}$ ، إذا كان المتغير العشوائي X يتبع التوزيع ذي الحدين بمعاملات محددة n و $p \in [0, 1]$ ، فإننا نكتب $X \sim B(n, p)$. ويُعطى احتمال الحصول على k نجاحات بالضبط في n تجربة برنولي مستقلة (بنفس المعدل p) بدالة الكتلة الاحتمالية التالية:

$$f(k,n,p) = Pr(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

للنجاحات: $k = 0, 1, 2, ..., n,$

حيث يعرف العامل

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!\,(n-k)!}$$

هذا العامل يمثل معامل ذات الحدين. ويمكن فهم الصيغة على النحو التالي: $p^k q^{n-k}$ هو احتمال الحصول على سلسلة من n تجربة برنولي مستقلة، حيث تكون k تجربة "ناجحة" والتجارب المتبقية n − k "فاشلة". وبما أن التجارب مستقلة، فإن أي سلسلة من n تجربة تحتوي على k نجاحات (و n − k عدد من الفشل) لها نفس احتمالية التحقق (بغض النظر عن مواقع النجاحات داخل السلسلة).

عليه فان التوزيع ذو الحدين يهتم باحتمالية الحصول على أي من هذه المتتاليات، مما يعني أنه يجب جمع احتمالية الحصول على إحداها ($p^k q^{n-k}$) $\binom{n}{k}$ مرات وبالتالي فان :

$$Pr(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

وهذا المفهوم يقودنا إلى تعريف التوليفات المتعلقة بالأشياء والتي يطلق عليها في علم الإحصاء بالتباديل والتوافيق .

5-3 التباديل والتوافيق Permutation and Combination

لفهم معنى التوافيق والتباديل لنعود إلى تجارب برنولي Bernoulli Trials في رمي العملات المعدنية:

1. تُرمى قطعة نقدية مرة واحدة؛ والنتيجة إما صورة (H) أو كتابة (T)

H أو T

2. تُرمى قطعتان نقديتان في آن واحد (أو تُرمى قطعة نقدية مرتين)؛ والنتيجة هي

H1H2، أو H1T2، أو T1H2، أو T1T2

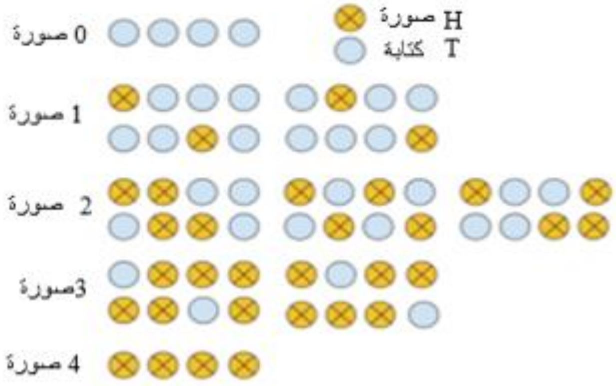
3. كما يمكننا رمي قطعة نقدية مرتين. فضاء العينة (حيث يكون ترتيب الرميتين مهمًا) هو : { (H, T), (H, H), (T, T), (T, H)}. لاحظ أن كلًا من (H, T)، (T, H)، ... هي نتائج محتملة للتجربة. يمكننا تعريف حدث يقع عند ظهور "صورة" في أي من الرميتين. يحتوي هذا الحدث على جميع النتائج باستثناء (T, T).

لنفترض تجربة بسيطة حيث يتم رمي عملة معدنية متوازنة أربع مرات. أوجد احتمال أن ينتج عن رميتين منها صورة. تمثيل للنتائج المحتملة لرمي قطعة نقدية متوازنة أربع مرات من حيث عدد مرات ظهور الصورة. كما هو واضح، فإن احتمال الحصول على صورتين بالضبط في أربع رميات هو 16/6 = 8/3، وهو ما يتطابق مع الحسابات. في هذه التجربة، لنفترض أن ظهور الصورة يُمثل النجاح، وظهور الكتابة يُمثل الفشل. وبما أن العملة تُعتبر متوازنة، فإن احتمال النجاح هو $p = 1/2$، ويُعطى الفشل q بالعلاقة التالية:

$$q = 1 - p = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

$$\begin{aligned} P(2) &= \binom{4}{2} p^2 q^{4-2} \\ &= 6 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 \\ &= \frac{3}{8}. \end{aligned}$$

وتظهر هذه الإحتمالات بالأشكال التالية :



لنأخذ مثال على هذا المفهوم :

مثال 3-3 :

ما احتمال أن يُظهر اثنان من النرد السداسيّ المتوازن والمستقل الرقم ستة عند رميهما؟

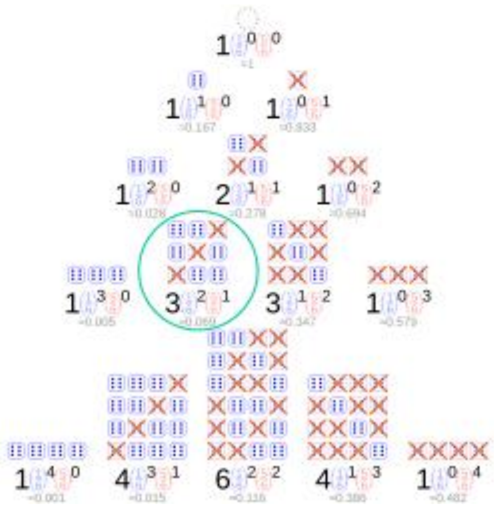
الحل: احتمالات الحصول على k من الرقم ستة من n من النرد المتوازن والمستقل، مع شطب النرد الذي لم يُظهر الرقم ستة - الرقم ستة مرتين من أصل 3 نرد مُحاط بدائرة.

عند رمي نرد واحد، احتمال الحصول على الرقم ستة هو $p = 1/6$، وبالتالي $q = 1 - p = 5/6$.

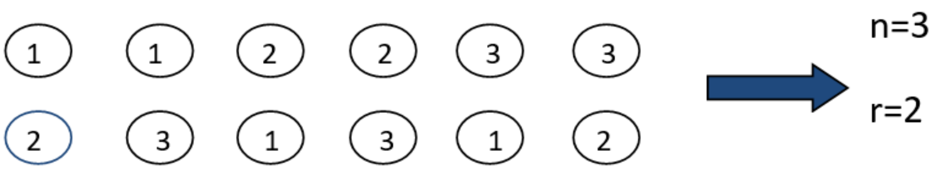
وكما سبق ذكره ، فان احتمال الحصول على الرقم ستة مرتين بالضبط من أصل ثلاث مرات هو:

$$
\begin{aligned}
P(2) &= \binom{3}{2} p^2 q^{3-2} \\
&= 3 \times \left(\frac{1}{6}\right)^2 \times \left(\frac{5}{6}\right)^1 \\
&= \frac{5}{72} \approx 0.069.
\end{aligned}
$$

وتظهر هذه الإحتمالات بالأشكال التالية :

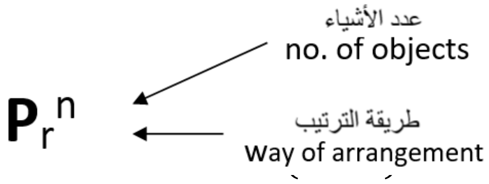


ولتعميم ذلك على n من تجارب برنولي، ضع في اعتبارك ثلاثة أشياء (n=3) ونريد ترتيبها اثنين في كل مرة (r=2).



وهذا يؤدي إلى ما يعرف بالتباديل Permutation. والتباديل هو نوع من أنواع ترتيب الأشياء، أو هو اختيار r من مجموعة من n من الأشياء دون إرجاع، حيث يكون الترتيب مهمًا. نريد ترتيب n من الأشياء r في كل مرة. وفي التباديل، يختلف الثلاثي أحمد وسارة وعلي عن الثلاثي علي وأحمد وسارة.

رياضياً ، يُكتب ترتيب التباديل ذلك على النحو التالي:

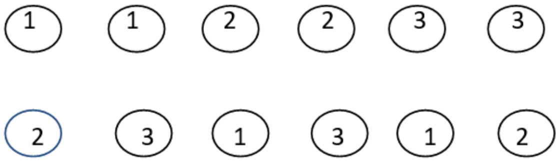


أو يكتب كالآتي:

$${}_{n}P_{r} = \frac{n!}{(n-r)!}$$

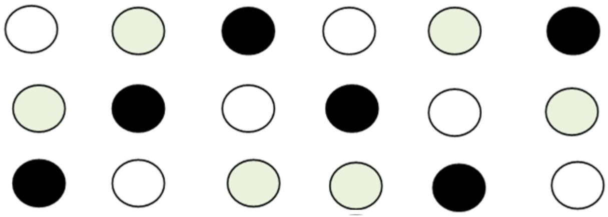
على سبيل المثال أعلاه

$$P_2^3 = \frac{3!}{(3-2)!} = \frac{3x2x1}{1!} = 6$$



وبالنسبة لثلاثة كرات ، نريد ترتيب تلك الكرات ثلاثة - ثلاثة في كل مرة؛

$$P_3^3 = \frac{3!}{(3-3)!} = \frac{3x2x1}{0!} = 6$$



n = 3

r = 3

مثال 3-4 :

ما هو العدد الإجمالي للترتيبات الممكنة المكونة من 4 أحرف (م، أ، ت، هـ) إذا تم استخدام كل حرف مرة واحدة فقط في كل ترتيب؟

الحل :

$${}_{4}P_{4} = \frac{4!}{(4-4)!} = \frac{4\cdot3\cdot2\cdot1}{1} = 24$$

مثال 3-5 :

بكم طريقة يمكن اختيار ثلاثة كتب من بين سبعة كتب ووضعها على رف؟

الحل : قد يكون هناك إجمالي

$$P_3^7 = \frac{7!}{(7-3)!} = 7 \times 6 \times 5 \times \frac{4!}{4!} = 210$$ طريقة

التوافيق Combination: التوافيق هو اختيار r من الأشياء من مجموعة مكونة من n من الأشياء دون إرجاع، ولا يهم الترتيب (بغض النظر عن ترتيب الاختيار). في التوافيق، يُعتبر الثلاثي سارة وأحمد وعلي هو نفسه الثلاثي علي وسارة وأحمد.

$$P_r^n = r!\, C_r^n$$

أو

$$C_r^n = \frac{P_r^n}{r!} = \frac{n!}{r!\,(n-r)!}$$

ويمكن كتابتها أيضاً على النحو التالي:

$${}_nC_r = \binom{n}{r} = \frac{{}_nP_r}{r!} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

مثال3-6:

جد ناتج ما يأتي :

$${}_7C_2 = \frac{7!}{2!(7-2)!} = \frac{7\cdot6\cdot5\cdot4\cdot3\cdot2\cdot1}{2\cdot1(5\cdot4\cdot3\cdot2\cdot1)} = \frac{7\cdot6}{2\cdot1} = \frac{42}{2} = 21$$

مثال3-7:

كم عدد التوافيق الممكنة من حرفين باستخدام الأحرف الستة: أ، ب، ج، د، هـ، و؟

الحل: هنا n= 6، r= 2

$$C_2^6 = \frac{6!}{2!\,(6-2)!} = 15$$

مثال 3-8:

يوجد 12 ولدًا و14 بنتًا في فصل درس الدكتور محمد توفيق لازم لمادة الوثوقية. جد عدد الطرق التي يمكن للدكتور لازم من خلالها اختيار فريق من 3 طلاب من الفصل للعمل على مشروع جماعي. يتكون الفريق من بنت واحدة وولدين.

الحل: الترتيب أو الموقع هنا ليس مهمًا ، عليه باستخدام مبدأ العد بالضرب :

$$\underbrace{{}_{12}C_2}_{\text{أولاد}} \cdot \underbrace{{}_{14}C_1}_{\text{بنات}} = \frac{12 \cdot 11}{2 \cdot 1} \cdot \frac{14}{1} = 66 \cdot 14 = 924$$

6-3 تطبيقات التوزيع ذو الحدين

يُعدّ التوزيع ذو الحدين أحد أبسط توزيعات الاحتمالات المنفصلة حيث له تطبيقات كثيرة في تقييم وثوقية المعدات والأجهزة الكهربائية . الآن نعود إلى التجربة العشوائية "تجربة برنولي" التي لها نتيجتان محتملتان فقط:

p = احتمال النجاح و q = احتمال الفشل

وبالتالي، p + q = 1

لنفترض أننا قمنا برمي ثلاث عملات معدنية مرة واحدة. ما هي النتائج النظرية الممكنة؟

ثلاثة صور H1 H2 H3 ، صورتان وكتابة واحدة H1 H2 T3

ثلاثة احتمالات لصورتين وكتابة واحدة H1 T2 H3 ، T1 H2 H3 ، كتابتان وصورة واحدة H1 T2 T3

ثلاثة احتمالات لصورة واحدة و كتابتان T1 H2 T3، T1 T2 H3

ثلاثة كتابات T1 T2 T3

لنفترض أن احتمال ظهور الصورة = p، واحتمال ظهور الكتابة = q، و n = عدد العملات المعدنية التي تم قلبها، واحتمال ظهور الصورة أو الكتابة = 0.5 (p=q=0.5).

يمكن تمثيل هذه التجربة الإحصائية بالنموذج ذي الحدين التالي:

$$(p1 + q1)(p2 + q2)(p3 + q3)$$

فإذا كانت

$$p1 = p2 = p3 = p$$

$$q1 = q2 = q3 = q$$

إذن

$$(p + q)\ (p + q)\ (p + q) = (p + q)^3$$

$$(p + q)^3 = 1p^3 + 3p^2q + 3pq^2 + 1q^3$$

$$(p + q)^3 = p^3 + 3p^2q + 3pq^2 + q^3$$

هذا ينطبق على 3 عملات معدنية، ولكن بالنسبة لعدد n من العملات المعدنية؛

$$(p + q)^n$$

التوزيع ذو الحدين باحتمالات غير متساوية

بشكل أعم، إذا كان p = احتمال النجاح و p – 1 = q = احتمال الفشل، فإن احتمال تسلسل نتائج محدد حيث يوجد r نجاحات و n-r فشلات هو:

$$p^r q^{n-r} = p^r (1 - p)^{n-r}$$

لنفترض أن X متغير عشوائي يمثل العدد الإجمالي للنجاحات من أصل n تجربة متسلسلة من تجارب برنولي.

r قيمة المتغير X (0، 1، 2، 3، ...).

فإذا أردنا الآن حساب احتمال حدوث $X = r$ نجاح بالضبط من أصل n تجربة، فإن

$$p^r (1 - p)^{n-r}$$

يجب أن يُحسب بعدد الطرق الممكنة لحدوث هذه النجاحات، وهو عدد التوافقيات الممكنة لـ n عنصرًا مأخوذة r مرة، ويُعطى بالعلاقة

$$C_r^n = \frac{n!}{r!\,(n - r)!}$$

وبالتالي، فإن دالة توزيع الاحتمال للمتغير العشوائي X هي

$$P_{X=r} = P[X = r, n, p] = \frac{n!}{r!\,(n-r)!} p^r (1-p)^{n-r} \qquad (3.1)$$

يمكن إعادة كتابة هذه المعادلة أيضًا على النحو التالي:

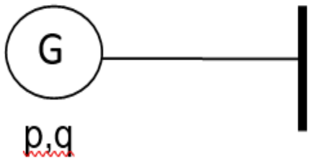
$$P_{X=r} = P[X = r, n, q] = \frac{n!}{r!\,(n-r)!} q^r (1-q)^{n-r} \qquad (3.2)$$

معنى p و q في مكونات نظام الطاقة:

لنفترض وحدة توليد طاقة، إذا كانت الوحدة لآ تعمل لمدة 10 ساعات خلال عام واحد، فإن:

$$P = \frac{8760-10}{8760} = 998858$$

$$q = \frac{10}{8760} = 0.001142$$



p + q = 0.998858 + 0.001142 = 1

مثال 3-9 :

لنفترض وجود مولدين كهربائيين G1 و G2، باحتمالات نجاح (تشغيل) p1 و p2، واحتمالات فشل (عدم تشغيل) q1 و q2 على التوالي. المولدان متصلان بقضيب توزيع واحد لتغذية حمل مشترك، فبتطبيق قانون ذات الحدين:

P1+q1 =1 كذلك p2+q2 =1

(P1+q1) x (p2+q2) =1

P1p2+p1q2+p2q1+q1q2=1

بإهمال فترة الصيانة: يكون لدينا 4 حالات:

P1P2 وحدتان تعملان

p1q2 الوحدة 1 تعمل، الوحدة 2 لا تعمل

p2q1 الوحدة 2 تعمل، الوحدة 1 لا تعمل

q1q2 الوحدتان 1 و2 لا تعملان

حالة خاصة: إذا كانت وحدة واحدة قادرة على تزويد الحمل بكامل الطاقة (اعتبارات التصميم)، فيكون :

النظام متاح (system available)

$$P_{system} = P1p2+p1q2+p2q1$$

ويكون النظام غير متاح (system unavailable)

$$Q_{system} = q1\ q2$$

فاذا كانت

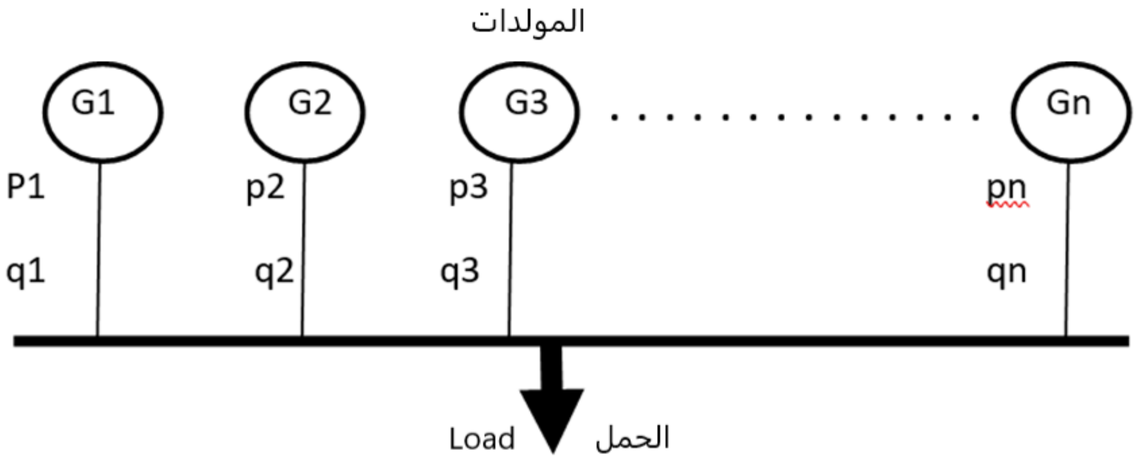
$$p1 = p2 = 0.99\ ,\ q1 = q2 = 0.01,$$

$$Q_{system} = q1q2 = (0,01) \times (0.01) = 0.0001$$

$$P_{system} = 1- Q_{system} = 1- 0.0001= 0.9999$$

الحالة العامة:

إذا كان لدينا (n) من وحدات التوليد غير المتطابقة التي تعمل بالتوازي وتغذي حملاً مشتركاً، كما هو موضح في الشكل - 1



في هذه الحالة :

$$(P1+q1) \times (p2+q2) \times (P3+q3) \times \ldots\ldots\ldots\ldots \times (pn+qn) = 1$$

هذا التعبير الرياضي يصعب تقييمه ، ولكن إذا افترضنا أن جميع الوحدات متطابقة، فإن:

$$P1 = p2 = P3 = \ldots\ldots\ldots\ldots = pn = p$$

$$q1 = q2 = q3 = \ldots\ldots\ldots\ldots = qn = q$$

أو

$$(p+q)^n =1$$

كذلك

$$(p+q)^n =\sum_{r=0}^{n} C_r^n\, p^r (1-p)^{n-r}$$

وهو ما يمثل توزيعًا ذا الحدين

مثال3-10 :

في نظام طاقة كهربائية يُغذّى من 150 وحدة توليد. احسب احتمال تعطل (أ) وحدتين توليد ، (ب) خمس وحدات توليد ، و(ج) 10 وحدات توليد في آنٍ واحد، علمًا بأن معدل التعطل (q) لكل وحدة هو0.06.

الحل:

(أ) بتطبيق المعادلة (2.2) ، فإن احتمال خروج r = 2 وحدة من الخدمة هو:

$$P_{X=r} = P[X = r, n, q] = \frac{n!}{r!\,(n-r)!} q^r (1-q)^{n-r}$$

$$P[X = 2{,}150{,}0.06] = \frac{150!}{2!\,(150-2)!} 0.06^2 (1-0.06)^{150-2} = 0.00424$$

(ب) وبالمثل، فإن احتمال خروج r = 5 وحدات من الخدمة هو:

$$P[X = 5{,}150{,}0.06] = \frac{150!}{5!\,(150-5)!} 0.06^5 (1-0.06)^{150-5} = 0.05839$$

(ج) احتمال خروج 10 وحدات من الخدمة هو:

$$P[X = 10{,}150{,}0.06] = \frac{150!}{10!\,(150-10)!} 0.06^{10} (1-0.06)^{150-10} = 0.12230$$

لاحظ أن احتمال وجود 10 وحدات خارج الخدمة هو الأعلى.

الخلاصة :

يجب أن تتوافر في التجربة أربع خصائص حتى يكون التوزيع ذو الحدين قابلاً للتطبيق:

1. عدد ثابت من المحاولات؛

2. يجب أن تؤدي كل محاولة إلى نجاح أو فشل؛

3. يجب أن تكون احتمالات النجاح متساوية في جميع المحاولات؛

4. يجب أن تكون جميع المحاولات مستقلة.

3- 7 توزيع بواسون الإحتمالي Poisson Distribution

توزيع بواسون هو توزيع احتمالي منفصل يُستخدم عندما يكون عدد مرات وقوع حدث ما في فترة زمنية معينة عشوائيًا تمامًا. في هذه الحالة، لا ينطبق التوزيع ذو الحدين على الرغم من أن معدل الحدوث ثابت. من أمثلة هذه الأحداث: احتمال وقوع عدد معين من ضربات البرق في فترة زمنية معينة، وعدد مرات حدوث عطل في كيبل طاقة طويل، واحتمال وقوع عدد معين من المكالمات الهاتفية في فترة زمنية معينة. ومع وجود عدد لا نهائي من القيم الممكنة للمتغير العشوائي، فإن احتمال أن يأخذ المتغير العشوائي القيمة $X=r$ يُعطى بالعلاقة التالية:

$$P(X=r)=\frac{(\lambda t)^r}{r!}e^{-\lambda t}$$

حيث λ هو مُعامل يصف عدد حالات النجاح لكل وحدة زمنية (معدل حدوث الحدث في فترة زمنية (t)). ويُسمى معدل الحدوث λ أيضًا بمعدل الفشل إذا كان X يُمثل حدث الفشل.

مثال 3-11:

في نظام طاقة كبير، يبلغ متوسط عدد أعطال الكيبلات الأرضية متعددة النوى 0.5 عطل سنويًا لكل 100 كيلومتر من الكيبل. بافتراض وجود كيبل محدد بطول 10 كيلومترات، ما هي احتمالات حدوث 0، 1، 2، ... إلخ عطل خلال فترة 40 عامًا؟

الحل:

بافتراض صحة عدد الأعطال للكيبل المذكور ولمدة 40 عامًا، فإن متوسط عدد الأعطال λt هو:

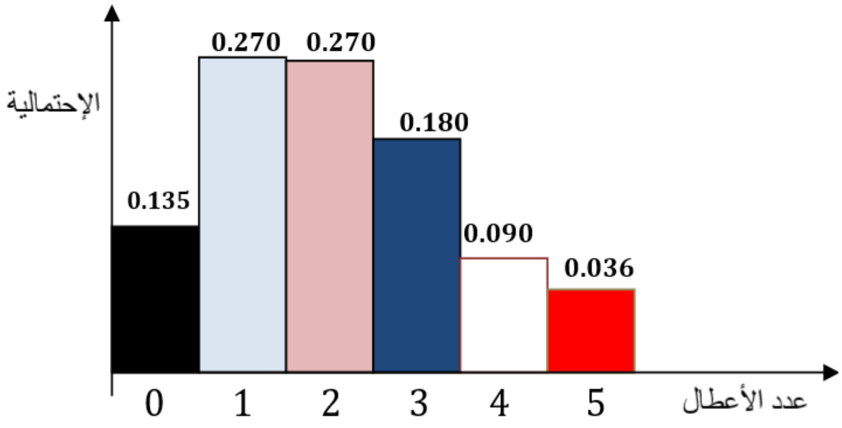
$$\lambda t=\frac{0.5x10x40}{100}=2.0$$

$$P(X=r)=\frac{(\lambda t)^r}{r!}e^{-\lambda t}=\frac{(2.0)^r}{r!}e^{-2.0}$$

بالنسبة للأعطال التي تكون فيها قيمة r تساوي 0، 1، 2، 3، 4، 5:

P(0) = 0.135
P(1) = 0.270
P(2) = 0.270
P(3) = 0.180
P(4) = 0.090
P(5) = (0.036)

يمكن تمثيل هذه القيم كما هو موضح في الشكل 3-6 الذي يعطي الرسم البياني للأحداث.



الشكل 3-6.

مثال3-12 :

بفترض أن أعطال محولات القدرة تتبع توزيع بواسون الاحتمالي. ولنفترض أن المحول يتعطل مرة واحدة كل 5 سنوات في المتوسط. ما احتمال عدم تعطل المحول خلال الاثني عشر شهرًا القادمة؟ وما احتمال تعطلّه مرة واحدة خلال الأربعة وعشرين شهرًا القادمة؟

الحل:

معدل الفشل λ = مرة واحدة كل 5 سنوات =0.2 سنة

عدد حالات الفشل المتوقعة خلال 12 شهرًا = 0.2

احتمالية عدم حدوث أي فشل تُعطى بالمعادلة التالية:

$$P(0) = \frac{(0.2)^0 e^{-0.2}}{0!} = 0.8187$$

عدد حالات الفشل المتوقعة خلال 24 شهرًا = 0.2 × 2 = 0.4. احتمال حدوث حالة فشل واحدة فقط خلال تلك الفترة هو:

$$P(1) = \frac{(0.4)^1 e^{-0.4}}{1!}$$
$$= 0.2681$$

8-3 التوزيع الأسي The Exponential Distribution

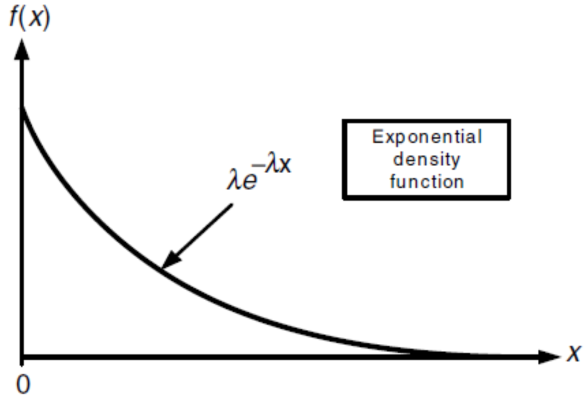
لو تسائل المرء :

- كم من الوقت سيمر قبل وقوع زلزال في منطقة معينة؟
- كم من الوقت نحتاج للانتظار قبل دخول زبون إلى متجرنا؟
- ما هي مدة عمل وحدة توليد الطاقة دون تعطل؟
- ما هي مدة عمل المحول الكهربائي دون تعطل؟

غالبًا ما تُجاب أسئلة كهذه باستخدام التوزيع الأسي، وذلك من منظور احتمالي حيث تتعلق جميع هذه الأسئلة بالوقت اللازم للانتظار قبل وقوع حدث معين. إذا كان وقت الانتظار هذا غير معروف، فمن المناسب غالبًا اعتباره متغيرًا عشوائيًا يتبع التوزيع الأسي. بعبارة أخرى، يتبع وقت الانتظار قبل وقوع حدث ما التوزيع الأسي إذا كان احتمال وقوع الحدث خلال فترة زمنية معينة يتناسب طرديًا مع طول تلك الفترة. رياضيًا، يُعد التوزيع الأسي دالة كثافة احتمالية متصلة تُعطى بالصيغة التالية:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

حيث λ هو مُعامل دالة الاحتمال هذه الذي يمتد من الصفر 0 إلى مالا نهاية ∞، كما هو موضح في الشكل 7-3 .

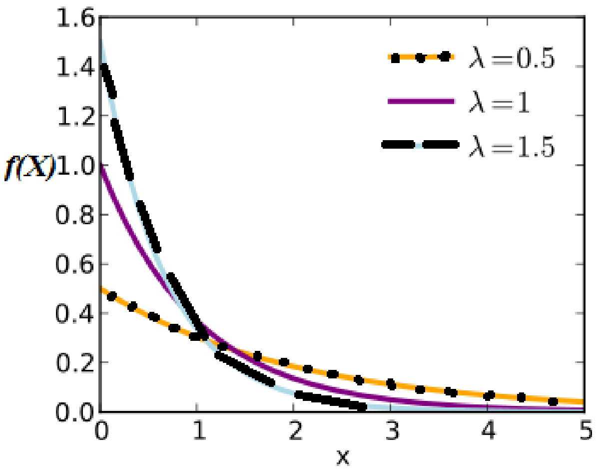


الشكل 7-3 التوزيع الأسي.

كذلك يصف المتوسط $E(x) = 1/\lambda$ التوزيع الأسي احتمالًا يتناقص أُسّيًا مع ازدياد قيمة x .

$$R(x) = \int_{x}^{\infty} \lambda\, e^{-\lambda x}\, dx = e^{-\lambda x}$$

ويوضح الشكل 3-8 تغير دالة كثافة الاحتمال مع المعامل λ.



الشكل 3-8 .

معايير أخرى مهمة:

- متوسط الزمن حتى حدوث الأعطال (MTTF) .

يمكن اعتبار القيمة المتوسطة المتوقعة لدالة التوزيع الأسي بمثابة متوسط الوقت اللازم لحدوث عطل، وتُعرف باسم متوسط الزمن حتى حدوث الأعطال (MTTF).

القيمة المتوقعة لدالة كثافة الاحتمال تُعطى بالصيغة التالية:

$$E(x) = \int x f(x)\, dx$$

في حالتنا، يصبح هذا

$$\mathrm{MTTF} = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda$$

يمكن إثبات أنه يمكن أيضًا الحصول على متوسط الوقت بين الأعطال (MTTF) عن طريق دمج دالة الموثوقية على النطاق بأكمله، أي

$$\mathrm{MTTF} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

مثال3-13:

يوجد 10 مولدات في محطة توليد كهرباء. يُفترض أن معدل تعطل كل وحدة هو 0.02عطل سنويًا. ما هو متوسط الزمن بين الأعطال في تلك المحطة؟

الحل:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

$$\lambda_{\text{محطة}} = 0.02 \times 10 = 0.2 \text{ في السنة}$$

• التباين والانحراف المعياري

لا يُعد متوسط الزمن بين الأعطال (MTTF) وحده كافيًا لوصف توزيع الأعطال بدقة. يلزم استخدام مقاييس أخرى. أحد هذه المقاييس هو التباين σ^2، والذي يُعرَّف كما يلي:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - MTTF)^2 \; f(t)dt$$

بعد مزيد من التبسيط، يمكن إعادة كتابة المعادلة أعلاه على النحو التالي :

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t^2 f(t)dt) - (MTTF)^2$$

يُعطى الانحراف المعياري للتوزيع الأسي بالصيغة التالية:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

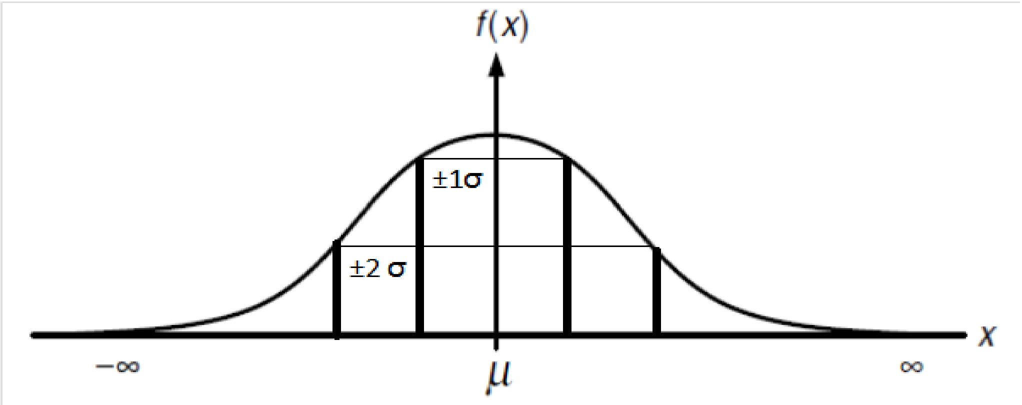
إن المعلمة λ، ومتوسط الوقت حتى الفشل $\lambda/1$، والتباين σ^2، والانحراف المعياري σ، كلها لها معانٍ فيزيائية مهمة عند تطبيق التوزيع الأسي على تقييمات الوثوقية.

3-9 التوزيع الطبيعي

يُعدّ التوزيع الطبيعي أكثر توزيعات الاحتمالات استخدامًا، نظرًا لأن معظم الظواهر الطبيعية تميل إلى اتباع هذا التوزيع. في الواقع، العديد من الأشياء موزعة توزيعًا طبيعيًا، أو قريبة جدًا منه. على سبيل المثال، الطول والذكاء موزعان توزيعًا طبيعيًا تقريبًا؛ كما أن أخطاء القياس غالبًا ما تتبع التوزيع الطبيعي. وهو تقريب جيد للعديد من التوزيعات الأخرى، مثل التوزيع ذي الحدين، عندما يكون حجم المجتمع كبيرًا. إنه

توزيع متصل؛ لذا، فإن المنحنى هو دالة كثافة الاحتمال التي تتخذ شكل جرس متماثل كما هو موضح في الشكل3-9 . الصيغة الرياضية لدالة كثافة الاحتمال هي:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$



الشكل3-9. دالة كثافة الاحتمال الطبيعي.

خصائص التوزيع الطبيعي

- متماثل، على شكل جرس
- متصل لجميع قيم X بين -∞ و ∞، بحيث يكون لكل مجال من الأعداد الحقيقية احتمال غير الصفر.
- -∞ ≤ X ≤ ∞
- له معلَمتان، μ و σ. لاحظ أن التوزيع الطبيعي هو في الواقع عائلة من التوزيعات، لأن μ و σ يحددان شكل التوزيع.

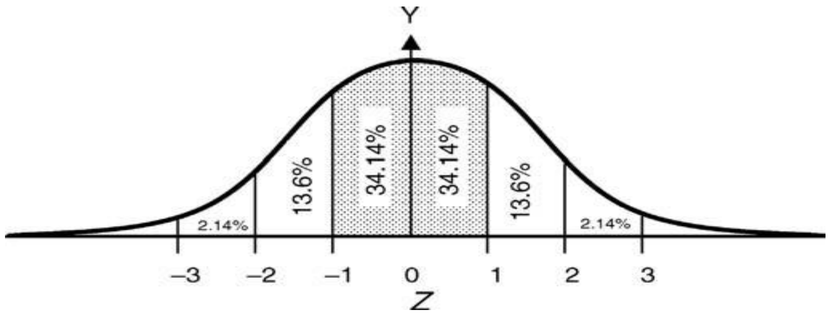
كما ذكرنا يوجد معلَمان لهذا التوزيع، هما μ و σ . يمكن إثبات أن المتوسط هو μ والانحراف المعياري هو σ . ولأنه متماثل، فإن المتوسط μ يتطابق بشكل طبيعي مع نقطة منتصف المنحنى الجرس. تمثل المساحة تحت المنحنى الاحتمالية. يمتد المنحنى من - ∞ إلى + ∞ ؛ مع ذلك، فإن المساحات عند الأطراف ضئيلة. أكثر من 99% من المساحة تقع ضمن 3σ ±، أي ثلاثة انحرافات معيارية عن المتوسط. في كثير من الأحيان، بدلاً من استخدام القيمة الفعلية لـ x، يتم القياس بدلالة الانحرافات المعيارية عن المتوسط، ويُطلق عليها z.

ويصبح المتوسط صفرًا على هذا المقياس المعياري كما هو موضح في الشكل3-11. وإذا تم ضبط القيمة المتوسطة للمنحنى الطبيعي عند صفر، وتم قياس جميع الانحرافات عن المتوسط بدلالة الانحرافات المعيارية، فإن معادلة المنحنى الطبيعي في صورته المعيارية لـ Y تصبح

$$Y = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right)e^{-z^2/2}$$

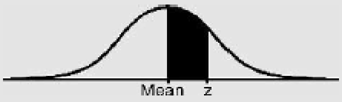
حيث $z = (x - \mu)/\sigma$

على سبيل المثال، لنفترض أن المتوسط (μ) يساوي 520 والانحراف المعياري (σ) يساوي 11. قيمة x تساوي 492.5، أي أقل من المتوسط بمقدار 2.5 انحراف معياري. على المقياس المعياري، تصبح $x =$ 492.5 ببساطة: $z = -2.5$. وتوجد جداول لحساب المساحة تحت منحنى التوزيع الطبيعي، وجميع هذه الجداول مبنية على المقياس المعياري.



الشكل 3-10 دالة كثافة الاحتمال الطبيعي المعياري. المساحة من 1 = z إلى 1 = z هي 68.28%؛ ومن 2 = z إلى 2 = z هي 95.48%؛ ومن 3 = z إلى 3 = z هي 99.76%.

جدول 3-1 مناطق التوزيع الاحتمالى الطبيعى القياسى.



z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2518	0.2549
0.7	0.2580	0.2612	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3869	0.3888	0.907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545

تابع الجدول 3-1.

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
2.5	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
2.6	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
2.7	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
2.8	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
2.9	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
3.0	0.49865	0.4987	0.4987	0.4988	0.4988	0.4989	0.4989	0.4989	0.4990	0.4990
4.0	0.4999683									

مثال 3-14

في التوزيع الطبيعي، ما النسبة المئوية للقيم التي تقع ضمن 1.6 انحراف معياري عن المتوسط؟

الحل:

بالرجوع إلى التوزيع الطبيعي الموضح في الجدول 3-1، نجد أن: $z = 1.6$ يقابل 0.4452 .

هذه هي المنطقة المظللة.

ينص السؤال على "ضمن 1.6 انحراف معياري عن المتوسط"، وهذا يشمل الجانب الآخر من المتوسط (أي المنطقة المقابلة لـ $z = 1.6$).

إذن، المساحة ضمن 1.6 انحراف معياري عن المتوسط:

$$2 \times 0.4452 = 0.8904 = 89.04\%$$

3-10 أنواع الأخطاء

بصورة عامة ، هناك نوعان من الأخطاء المحتملة في علم الإحصاء وهي :

- الخطأ من النوع الأول: رفض الفرضية عندما تكون صحيحة.
- الخطأ من النوع الثاني: قبول الفرضية عندما تكون خاطئة.

الخطأ من النوع الأول، أو النتيجة الإيجابية الخاطئة، هو رفض فرضية العدم الصحيحة بشكل غير صحيح في اختبار الفرضيات الإحصائية. أما الخطأ من النوع الثاني، أو النتيجة السلبية الخاطئة، فهو عدم رفض فرضية العدم الخاطئة.

يقع التحليل في خطأ من النوع الأول عندما يتم رفض أحد الافتراضات الأساسية بشكل خاطئ بسبب معلومات جديدة مضللة. في المقابل، يقع خطأ من النوع الثاني عندما يتم التمسك بهذا الافتراض، بسبب بيانات معيبة أو غير كافية، في حين أن قياسات أفضل كانت ستُظهر عدم صحته. على سبيل المثال، في سياق الاختبارات الطبية، إذا اعتبرنا أن فرضية العدم هي "هذا المريض غير مصاب بالمرض"، فإن تشخيص وجود المرض في حين أنه غير مصاب يُعد خطأ من النوع الأول، بينما تشخيص عدم إصابة المريض بالمرض في حين أنه مصاب به يُعد خطأ من النوع الثاني. إن الطريقة التي تُصاغ بها فرضية العدم في سياق التوقعات الافتراضية تؤثر على الطرق المحددة التي تظهر بها أخطاء النوع الأول والنوع الثاني، وهذا يختلف باختلاف السياق والتطبيق. بشكل عام، لا يمكن القضاء تمامًا على خطر هذه الأخطاء، بل يمكن فقط الموازنة بين النوعين، على سبيل المثال عن طريق تغيير عتبة الأهمية.

تُستخدم معرفة أخطاء النوع الأول وأخطاء النوع الثاني على نطاق واسع في مجالات العلوم الطبية، والإحصاء الحيوي، وعلوم الحاسوب. ويُعدّ تقليل هذه الأخطاء هدفًا للدراسة ضمن النظرية الإحصائية، مع أن القضاء التام على أيٍّ منهما أمرٌ مستحيل عندما لا تكون النتائج ذات الصلة مُحدَّدة بعمليات سببية معروفة وقابلة للملاحظة.

التعريف: الخلفية الإحصائية

في نظرية الاختبارات الإحصائية، يُعدّ مفهوم الخطأ الإحصائي جزءًا لا يتجزأ من اختبار الفرضيات. يتمحور الاختبار حول اختيار فرضيتين متنافستين: الفرضية الصفرية، ويرمز لها بـ H_0 . والفرضية البديلة، ويرمز لها بـ H_1. يشبه هذا المفهوم الحكم في المحاكمة. تُمثل الفرضية الصفرية موقف المتهم: فكما يُفترض براءته حتى تثبت إدانته، تُفترض صحة الفرضية الصفرية حتى تُقدم البيانات أدلة قاطعة تُعارضها. أما الفرضية البديلة فتُمثل الموقف ضد المتهم. وبالتحديد، تتضمن الفرضية الصفرية أيضًا غياب أي فرق أو ارتباط. وبالتالي، لا يُمكن أن تكون الفرضية الصفرية أبدًا هي وجود فرق أو ارتباط. وإذا تطابقت نتيجة الاختبار مع الواقع، فقد تم اتخاذ قرار صحيح. أما إذا لم تتطابق نتيجة الاختبار مع الواقع، فقد وقع خطأ. هناك حالتان يكون فيهما القرار خاطئًا. قد تكون الفرضية الصفرية صحيحة، وفي هذه الحالة نرفضها.

{H0{0}} من جهة أخرى، قد تكون الفرضية البديلة صحيحة، وفي هذه الحالة لا نرفضها.

- الخطأ من النوع الأول

الخطأ الأول هو رفض الفرضية الصفرية عن طريق الخطأ نتيجةً لإجراء الاختبار. يُسمى هذا النوع من الخطأ بالخطأ من النوع الأول (إيجابي كاذب)، ويُشار إليه أحيانًا بالخطأ من النوع الأول. في مثال قاعة المحكمة، يُقابل الخطأ من النوع الأول إدانة متهم بريء.

- الخطأ من النوع الثاني

الخطأ الثاني هو عدم رفض الفرضية الصفرية عن طريق الخطأ نتيجةً لإجراء الاختبار. يُسمى هذا النوع من الخطأ بالخطأ من النوع الثاني (سلبي كاذب)، ويُشار إليه أيضًا بالخطأ من النوع الثاني. في مثال قاعة المحكمة، يُقابل الخطأ من النوع الثاني تبرئة مجرم.

معدل الخطأ عند نقطة التقاطع **Crossover error rate**

معدل الخطأ عند نقطة التقاطع (CER) هو النقطة التي تتساوى عندها أخطاء النوع الأول وأخطاء النوع الثاني. يوفر النظام ذو قيمة CER المنخفضة دقةً أكبر من النظام ذي قيمة CER المرتفعة. مع ثبات جميع العوامل الأخرى، فإن تساوي معدل أخطاء النوع الأول وأخطاء النوع الثاني (أي CER) سيؤدي إلى أدنى معدل خطأ إجمالي.

1-10-3 معدل الخطأ

الاختبار المثالي هو الذي يخلو من أي نتائج إيجابية خاطئة أو سلبية خاطئة. مع ذلك، فإن الأساليب الإحصائية احتمالية، ولا يمكن الجزم بصحة الاستنتاجات الإحصائية. فكلما وُجد شك، وُجد احتمال الخطأ. وبناءً على ذلك، فإن جميع اختبارات الفرضيات الإحصائية معرضة لاحتمالية ارتكاب خطأ من النوع الأول وخطأ من النوع الثاني.

معدل الخطأ من النوع الأول هو احتمال رفض الفرضية الصفرية بافتراض صحتها. صُمم الاختبار بحيث يبقى معدل الخطأ من النوع الأول أقل من حد مُحدد مسبقًا يُسمى مستوى الدلالة، ويُرمز له عادةً بالحرف اليوناني α (ألفا)، ويُسمى أيضًا مستوى ألفا. عادةً ما يُحدد مستوى الدلالة عند 0.05 (5%)، مما يعني أنه من المقبول وجود احتمال بنسبة 5% لرفض الفرضية الصفرية الصحيحة بشكل خاطئ.

يُرمز لمعدل الخطأ من النوع الثاني بالحرف اليوناني β (بيتا)، ويرتبط بقوة الاختبار، والتي تساوي $1-\beta$. يُوازن هذان النوعان من معدلات الخطأ فيما بينهما: فبالنسبة لأي مجموعة عينات مُعطاة، فإن الجهد المبذول لتقليل أحد نوعي الخطأ يؤدي عمومًا إلى زيادة النوع الآخر.

3-10-2 جودة اختبار الفرضية

يمكن التعبير عن الفكرة نفسها من حيث معدل النتائج الصحيحة، وبالتالي استخدامها لتقليل معدلات الخطأ وتحسين جودة اختبار الفرضية. ولتقليل احتمالية ارتكاب خطأ من النوع الأول، يُعدّ تشديد قيمة ألفا أمرًا بسيطًا وفعالًا. على سبيل المثال، يمكن ضبط قيمة ألفا على 0.01 بدلًا من 0.05. ولتقليل احتمالية ارتكاب خطأ من النوع الثاني، المرتبط ارتباطًا وثيقًا بقوة التحليلات، يمكن زيادة قوة التحليلات إما بزيادة حجم عينة الاختبار أو تخفيف مستوى ألفا، مثل ضبط مستوى ألفا على 0.1 بدلًا من 0.05. وتكون إحصائية الاختبار قوية إذا تم التحكم في معدل الخطأ من النوع الأول.

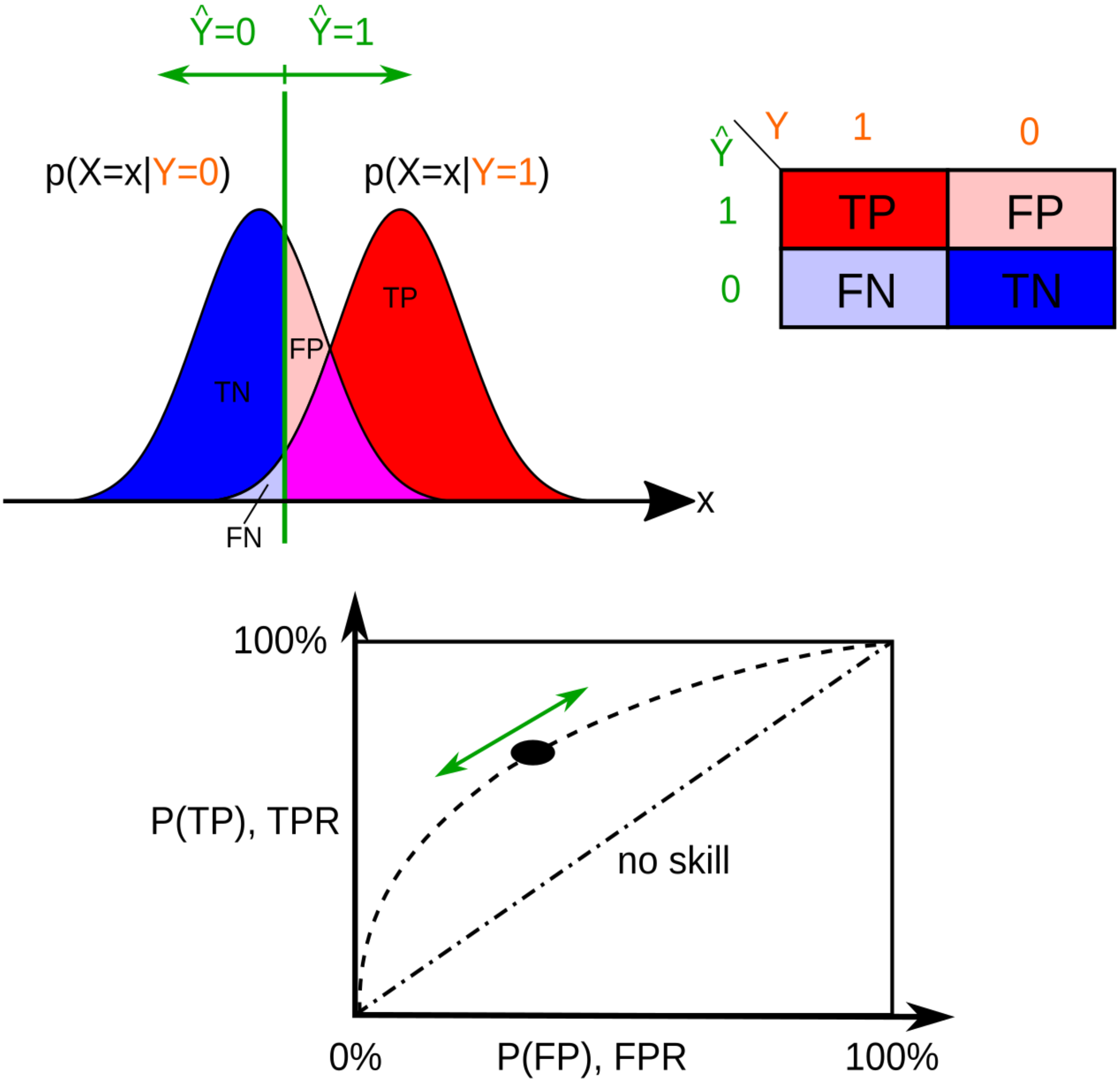
يمكن أيضًا استخدام قيم عتبة (قطع) مختلفة لجعل الاختبار أكثر دقة أو حساسية، مما يُحسّن جودته. على سبيل المثال، تخيّل اختبارًا طبيًا يقيس فيه الباحث تركيز بروتين معين في عينة دم. يمكن للباحث تعديل العتبة (الخط العمودي الأسود في الشكل3-11)، ويُشخّص الأشخاص بالمرض إذا تجاوزت أي قيمة هذه العتبة. وفقًا للصورة، يؤدي تغيير العتبة إلى تغييرات في النتائج الإيجابية والسلبية الخاطئة، بما يتوافق مع الحركة على المنحنى.

مثال 3-15:

بما أنه من المستحيل في التجارب العملية تجنب جميع أخطاء النوع الأول والنوع الثاني، فمن المهم مراعاة مستوى المخاطرة الذي يرغب المرء في تحمله لرفض الفرضية الصفرية (H0) أو قبولها بشكل خاطئ. يكمن الحل في الإبلاغ عن قيمة الاحتمال (p-value) أو مستوى الدلالة الإحصائية (α). على سبيل المثال، إذا كانت قيمة الاحتمال لنتيجة إحصائية اختبار ما هي 0.0596، فإن احتمال رفض الفرضية الصفرية (H0) بشكل خاطئ، بافتراض صحتها، هو 5.96%. أو، إذا افترضنا أن الإحصائية أُجريت عند مستوى دلالة إحصائية (α)، مثل 0.05، فإننا نسمح برفض الفرضية الصفرية (H0) بشكل خاطئ بنسبة 5%. يُعد مستوى الدلالة الإحصائية (α) البالغ 0.05 شائعًا نسبيًا، ولكن لا توجد قاعدة عامة تنطبق على جميع الحالات.

قياس سرعة المركبات

الحد الأقصى للسرعة على الطرق السريعة في كثير من دول العالم هو 120 كيلومترًا في الساعة (75 ميلًا في الساعة). تم تركيب جهاز لقياس سرعة المركبات المارة. لنفترض أن الجهاز سيجري ثلاث قياسات لسرعة مركبة عابرة، مسجلاً النتائج كعينة عشوائية X1، X2، X3. ستقوم شرطة المرور بتغريم السائقين أو عدم تغريمهم بناءً على متوسط السرعة $\bar{X}$. أي أن إحصائية الاختبار



الشكل 3- 11 تتداخل النتائج المُستخلصة من العينة السلبية (المنحنى الأيسر) مع النتائج المُستخلصة من العينات الإيجابية (المنحنى الأيمن). بتغيير قيمة القطع (الخط العمودي)، يُمكن تقليل معدل النتائج الإيجابية الخاطئة (FP) على حساب زيادة عدد النتائج السلبية الخاطئة (FN)، أو العكس (TP = النتائج الإيجابية الحقيقية، TPR = معدل النتائج الإيجابية الحقيقية، FPR = معدل النتائج الإيجابية الخاطئة، TN = النتائج السلبية الحقيقية).

$$T = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} = \overline{X}$$

بالإضافة إلى ذلك، نفترض أن القياسات X1 وX2 وX3 تُنمذج وفقًا للتوزيع الطبيعي N(μ,2). عندئذٍ، يجب أن يتبع T التوزيع الطبيعي N(μ,2/3)

يمثل المعامل μ السرعة الحقيقية للمركبة المارة. في هذه التجربة، يجب أن تكون الفرضية الصفرية H0 والفرضية البديلة H1 كما يلي

H_0: μ=120 against H_1: μ>120.

مثال 3-16 :

يُشتبه في أن أعمدة خط نقل الطاقة تتآكل. إذا تجاوزت نسبة التآكل 25%، فيجب البدء ببرنامج استبدال.

الفرضية: أكثر من 25% من الأعمدة متضررة

المعاينة: تم فحص 50 عمودًا من أصل 2000

الإجراءات :

1. الفرضية صحيحة - يلزم استبدال العمود

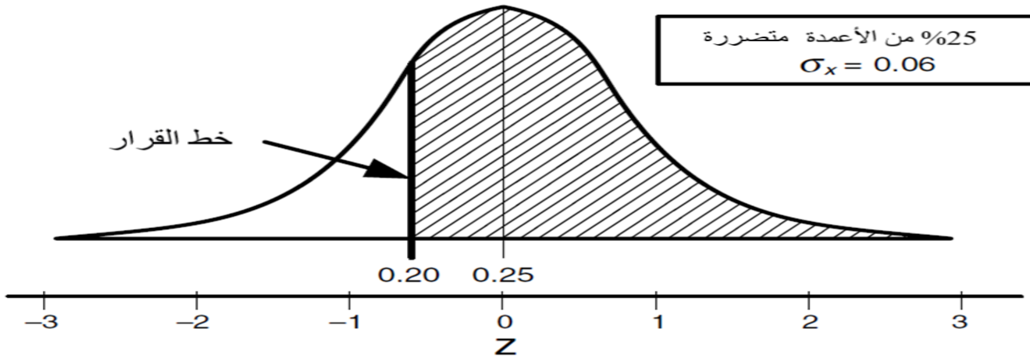
2. الفرضية غير صحيحة - لا يلزم استبدال العمود

قاعدة القرار: إذا أظهرت العينة وجود أكثر من 10 أعمدة متضررة ، يتم تنفيذ الإجراء 1، وإلا يتم تنفيذ الإجراء2 .

لاستبدال الأعمدة المتضررة ، نريد الاستبدال إذا كانت النسبة المئوية الحقيقية للأعمدة المتضررة 25% أو أكثر، ولكن قاعدة القرار لدينا هي أنه إذا كانت نسبة الأعمدة المتضررة في العينة أكبر من 0.2 (50/10)، فيجب علينا إجراء الاستبدال. عندما تكون نسبة الأعمدة المتضررة في العينة 0.25، يكون الانحراف المعياري للمجموع : $\sqrt{0.25 \times (1 - 0.23)} = 0.433$. وإذا سحبنا عينات من هذا المجمع فسيكون متوسط توزيع المعاينة أيضًا 0.25، والانحراف المعياري سيكون جزء من توزيع العينة:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2000-50}{2000-1}}\frac{0.433}{\sqrt{50}} = 0.06$$

هناك احتمال بنسبة 80% أن تكون نسبة العينة لدينا أعلى من 0.2 (المنطقة المظللة في الشكل3-12)، مما يدفعنا إلى استنتاج أن 25% من العينة تالفة، وبالتالي يلزم استبدالها (قرار صحيح). في 20% من الحالات، ستنخفض نسبة العينة لدينا إلى أقل من 0.2، وسنستنتج خطأً أن نسبة الأعمدة التالفة في العينة أقل من 25% (خطأ من النوع الأول).



الشكل 3- 12 النسبة المئوية من الأعمدة متضررة.

3-10-3 التحكم في الأخطاء

بالنظر إلى الأشكال في الفقرت 3-8-1 و 3-8-2 ، يتضح أن قاعدة القرار هي في الواقع خط القرار على منحنى توزيع المعاينة. إذا تم تحريك هذا الخط إلى اليمين، سيزداد الخطأ من النوع الأول، بينما سينخفض الخطأ من النوع الثاني. أحيانًا يكون أحد نوعي الخطأ أكثر خطورة من الآخر. يمكن حينها تعديل قاعدة القرار لتقليل هذا النوع من الخطأ، لكن النوع الآخر من الخطأ سيزداد. على سبيل المثال، في معاينة القبول، يمكننا جعل معايير القبول/الرفض أكثر صرامة. ونتيجة لذلك، لن يمر عدد أقل من الدفعات المعيبة فحسب، بل سيتم رفض المزيد من الدفعات الجيدة أيضًا. هناك طريقة لتقليل كلا النوعين من الأخطاء في آن واحد، وهي زيادة حجم العينة، ولكن مرة أخرى، هناك مفاضلة بين الدقة والتكلفة.

3-11 الاستنتاجات

قدّم هذا الفصل المفاهيم والمبادئ الأساسية لبعض نظريات الاحتمالات الشائعة الاستخدام في تقييمات الوثوقية، وذلك باستخدام أمثلة عددية بسيطة. كما تم توضيح تطبيقات التوزيعات المختلفة في حل بعض المشكلات اليومية النموذجية، بطريقة سهلة الفهم. يلعب التحليل الإحصائي للمشكلات الواقعية دورًا حيويًا في اتخاذ القرارات اليومية في العديد من الشركات والصناعات. سيتم تعزيز نظريات الاحتمالات من خلال أمثلة متكررة في الفصول اللاحقة، وسيتم توضيح أهميتها في المواقف الواقعية.

الفصل 4

مبادئ الوثوقية RELIABILITY PRINCIPLES

4-1 مقدمة

يتناول هذا الفصل تعاريف باساسيات و نظريات الوثوقية بدء من معنى معدلات الفشل والنجاح لمكونات نظام معين و محاولات لتطبيق مبادئ نظرية الموثوقية لإنشاء نموذج رياضي لهذه الأمور. قد تختلف "مبادئ الموثوقية" باختلاف المجال، ولكن في الهندسة، وتصميم الأنظمة، وهندسة وثوقية المواقع Site Reliability Engineering (SRE)، وتتمثل المبادئ الأساسية عادةً فيما يلي:

تحمل الأعطال Fault Tolerance : تصميم الأنظمة بحيث تستمر في العمل حتى عند تعطل مكوناتها باستخدام : خوادم احتياطية، ووحدات تزويد طاقة احتياطية. و التكرار Redundancy : في المعدات لتجنب نقاط الفشل الفردية من خلال وجود نسخ متعددة من المكونات الحيوية. قواعد بيانات مُكررة، ومسارات شبكة متعددة. وكذلك المرونة Resiliency : يجب أن تتعافى الأنظمة بسرعة من الانقطاعات وأن تتكيف مع اظروف المتغيرة. تجاوز الأعطال التلقائي، وبنية تحتية ذاتية الإصلاح. البساطةٍ Simplicity : تميل الأنظمة الأبسط إلى أن تكون أكثر وثوقية نظرًا لقلة احتمالات الفشل فيها. تقليل التعقيد غير الضروري. ملاحظة التدهور التدريجي Graceful Degradation عند تعطل أجزاء من النظام، يجب أن يوفر النظام وظائف محدودة بدلاً من التوقف التام. التحسين المستمر Continuous Improvement التعلم من الحوادث والأخطاء الوشيكة. إجراء تحليلات ما بعد الحادث وتنفيذ الإجراءات التصحيحية.

4-2 معدل الفشل FAILURE RATE MODEL

4-2-1 المفهوم والنموذج

بما أن كل قطعة من المعدات في المنظومة الكهربائية ستتعطل في نهاية المطاف إذا ظلت قيد التشغيل لفترة طويلة، فإن لكل قطعة معدل فشل خاص بها. على أية حال فبالنسبة لبعض القطع، يكون معدل الفشل مرتفعًا، بينما قد يكون منخفضًا للغاية بالنسبة لقطع أخرى.

إن معدل الفشل يُعرَّف بأنه عدد حالات الفشل المتوقعة لكل وحدة خلال فترة زمنية محددة. وهو ببساطة قيمة متوقعة. عند حساب معدل الفشل لمجموعة من الوحدات، يجب استخدام إجمالي وقت تشغيل الوحدات بدلاً من وقت التشغيل الفعلي. وهذا يعبر عنه بالصيغة التالية :

$$\text{معدل الفشل} ، \lambda = \frac{\text{عدد حالات الفشل}}{\text{اجمالي وقت تشغيل الوحدات}}$$

مثال 4-1 :

تم اختبار عشرة محولات كهربائية لمدة 500 ساعة لكل منها، وتعطلت أربعة محولات بعد فترات الاختبار التالية:

تعطل محول واحد بعد 50 ساعة

تعطل محول واحد بعد 150 ساعة

تعطل محولان بعد 400 ساعة

ما هو معدل تعطل هذه الأنواع من المحولات؟

الحل :

- نحسب إجمالي وقت تشغيل الوحدات

$= (1\times50 + 1 \times 150 + 2 \times 400 + 6 \times 500) = 4000$ وحدة .ساعة

معدل الفشل $\lambda = \frac{4}{4000} = 0.001$ فشل لكل وحدة. ساعة

مثال 4-2 :

تم اختبار ثلاثين محركًا لمدة 200 ساعة. تعطلت خمسة محركات أثناء الاختبار. حدثت الأعطال بعد فترات الاختبار التالية:

المحرك 1: 60 ساعة

المحرك 2: 71 ساعة

المحرك 3: 157 ساعة

المحرك 4: 160 ساعة

المحرك 5: 170 ساعة

ما هو معدل الفشل المُقدَّر؟

الحل:

إجمالي عدد ساعات تشغيل الوحدات:

= 60 + 71 + 157 + 160 + 170 + 25 × 200 = 5618 وحدة .ساعة

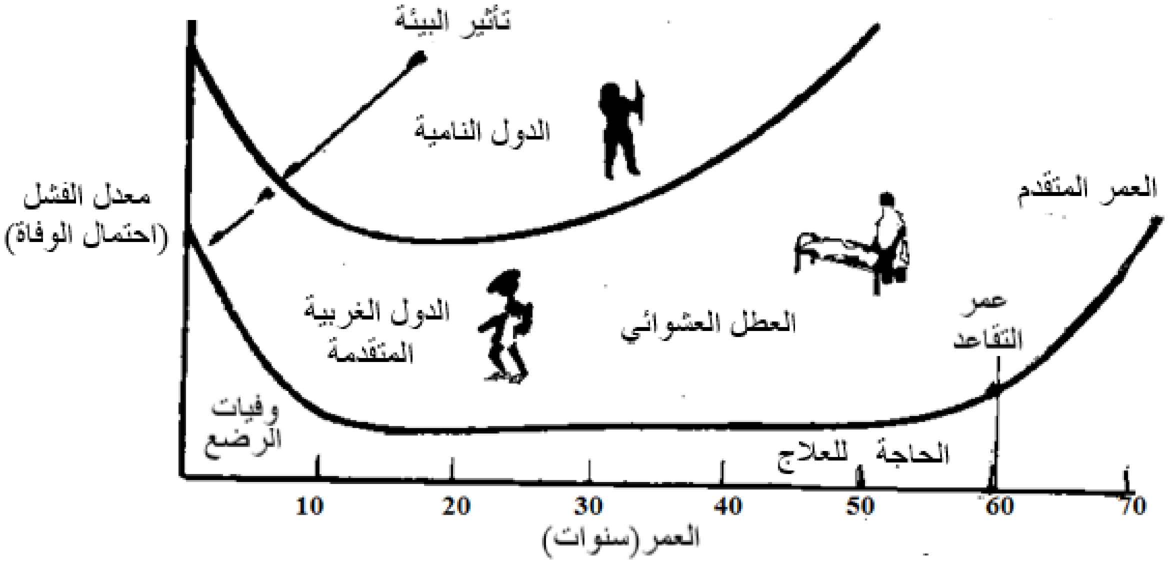
معدل الفشلλ = عدد حالات الفشل / إجمالي وقت تشغيل الوحدات

معدل الفشل $\lambda = \frac{5}{5168} = 0.00092$ فشل لكل وحدة . ساعة

2-2-4 مفهوم منحنى حياة المكونات

يتم تشبيه حياة المكونات بمنحنى الحوض (المنحني يشبه حوض الإستحمام Bathtub Curve) . فبالنسبة لحياة الإنسان ، مثلاً تتألف من ثلاث فترات رئيسية متميزة كما هو موضح في الشكل4-1:

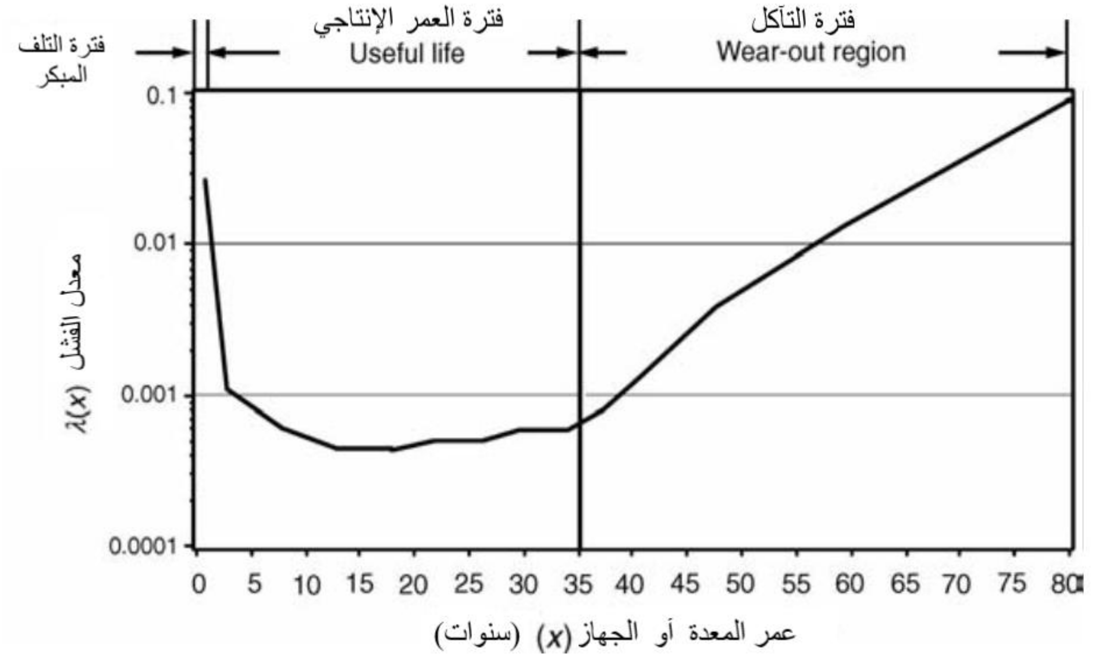
1. فترة وفيات الرضع
2. فترة العمر الإنتاجي
3. فترة التدهور



الشكل4-1: تمثيل حياة الإنسان بمنحنى معدل الفشل مقابل الزمن الذي يشبه حوض الاستحمام .

كما أن عمر المعدات يمر بثلاث فترات رئيسية مماثلة كما هو موضح في الشكل4-2:

1. فترة التلف المبكر
2. فترة العمر الإنتاجي
3. فترة التآكل



الشكل4-2. منحنى حوض الاستحمام: معدل الفشل مقابل الزمن للمكونات.

• خلال فترة وفيات الرضع، يكون معدل الفشل مرتفعًا بسبب وجود نقاط ضعف في عملية التصنيع، مثل رداءة الصنعة، واستخدام مكونات دون المستوى المطلوب، وما إلى ذلك. ومع ظهور هذه النقاط الضعيفة تدريجيًا بفعل ضغط التشغيل، يستمر معدل الفشل في الانخفاض حتى يصل إلى مستوى منخفض وثابت.

• يدخل الجهاز بعد ذلك في فترة عمره التشغيلي الافتراضي، حيث تصبح الأعطال عشوائية وتحدث في أوقات غير متوقعة. كما أن هذه الأعطال لا ترتبط بعمر الجهاز.

• عندما تبدأ مكونات الجهاز بالتآكل، يرتفع معدل الأعطال بشكل ملحوظ نتيجةً للتلف.

تتناول معظم أعمال الموثوقية فترة العمر الإنتاجي عندما يكون معدل الفشل ثابتًا وينطبق التوزيع الأسي. أحد التوزيعات الممكنة العديدة.

3-4 نموذج الوثوقية **Reliability Model**

لا يلزم حساب العلاقة بين معدل الفشل والوثوقية من المبادئ الأساسية في كل مرة. يمكن اشتقاق بعض الصيغ البسيطة جدًا للمكونات ذات معدل الفشل الثابت.

لنفترض بداية حالة اختبار عدد ثابت من العناصر المتماثلة (N_o). بعد مرور الوقت t ، ستتعطل بعض الوحدات N_f بينما ستظل أخرى تعمل. لنرمز لها بـ N_s . بطبيعة الحال، يزداد N_f مع مرور الوقت بينما يتناقص N_s مع مرور الوقت.

ليكن:

$N_s(t)$ = عدد العناصر السليمة عند الزمن t

$N_f(t)$ = عدد العناصر المعطلة عند الزمن t

$$N_o = N_s(t) + N_f(t)$$

ولأن الوثوقية هي احتمال عدم الفشل خلال فترة زمنية محددة. فإن الوثوقية عند الزمن t، وهي احتمال البقاء، هي

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_o} = \frac{N_o - N_f(t)}{N_o}$$

$$R(t) = \frac{N_s}{N_o} = 1 - \frac{N_f}{N_o}$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{-1}{N_o}\frac{dN_f}{dt}$$

اما احتمال الفشل فهو

$$Q(t) = \frac{N_f}{N_o}$$

عليه فان

$$R(t) + Q(t) = 1$$

فهما متكملتان (متممتان)

الآن إذا عرّفنا $-\frac{1}{No}\frac{dNf}{dt}$ على أنها دالة كثافة الفشل اللحظية

(= دالة كثافة الاحتمال) f(t)، ومنها:

$$-\frac{dR(t)}{dt} = f(t)$$

وبمكاملة طرفي المعادلة اعلاه ينتج

$$\int_{R(0)}^{R(t)} -dR(t) = \int_0^t f(t)dt$$

$$1- R(t) = \int_0^t f(t)dt \quad .... \quad (1) \quad (R(0) = 1 \text{ لكون})$$

فإذا كان معدل الفشل ثابتًا، فيمكننا تعريف ما يلي:

$$\frac{dN_f}{dt} = \lambda N_s$$

ولما كان لدينا

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{-1}{N_o}\frac{dN_f}{dt}$$

$$= -\lambda \frac{N_s}{N_o}$$

$$= -\lambda R(t)$$

$$\int \frac{1}{R} dR = -\int \lambda \, dt$$

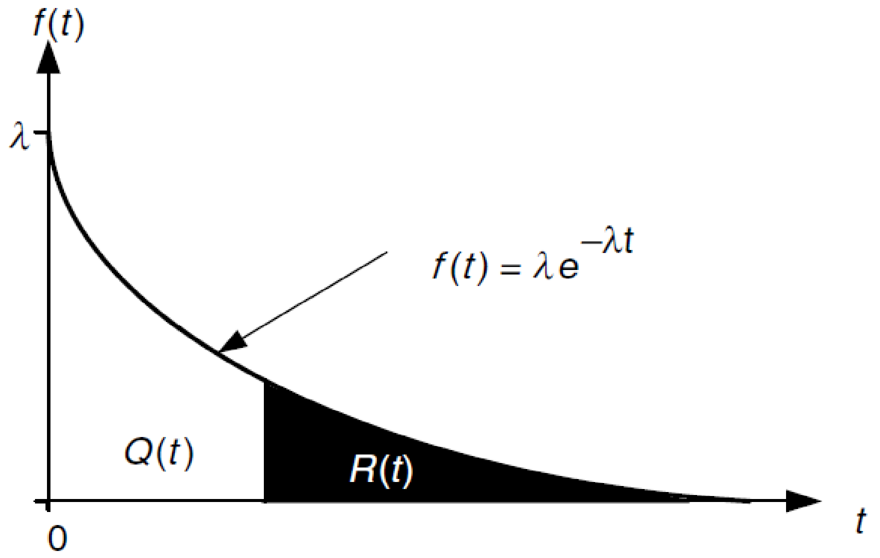
$$\ln R(t) = -\lambda t$$

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$Q(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

حيث أن جميع الأشياء التي لها معدل فشل ثابت تتبع احتمال الفشل كدالة أسية هذا.

يمثل $R(t)$ احتمال البقاء في العمل خلال الزمن t. وكما هو الحال مع الاحتمالات المتصلة، يتم اشتقاق دالة كثافة احتمالية بحيث تمثل المساحة تحت المنحنى الاحتمال. ولأن $R(t)$ يتناقص مع الزمن، يتم اشتقاق دالة كثافة الاحتمالية $f(t)$ لمكملتها $Q(t)$، وهي احتمال الفشل في الزمن t كما هو موضح في الشكل3-4.



الشكل 4-3 دالة الكثافة الأسية و $R(t)$ و $Q(t)$.

حيث أن جميع الأشياء التي لها معدل فشل ثابت تتبع احتمال الفشل الأسي هذا.

مثال 4-3 :

تم تركيب 200 مكثف كهربائي (متسعة) ، وفي نهاية كل عام، تم إحصاء عدد الوحدات المتبقية فكانت كالآتي :.

نهاية	عدد الوحدات المتبقية
السنة 1	196
السنة 2	188
السنة 3	179
السنة 4	175
السنة 5	169

بناءً على هذه الأرقام، ما هي وثوقية المكثفات لمدة 5 سنوات؟ وما هي الوثوقية السنوية للسنة الرابعة؟ بافتراض أن دالة الوثوقية أسية، أي $R(t) = e^{-\lambda t}$، ما هو معدل الفشل لهذه الصيغة؟

الحل:

الوثوقية لمدة 5 سنوات = 169 ÷ 200 = 0.845

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\text{الوثوقية السنوية للسنة 4} = \frac{\text{عدد الوحدات العاملة في نهاية السنة 4}}{\text{عدد الوحدات في بداية السنة 4}}$$

$$= \frac{175}{179} = 0.9777$$

لمدة 5 سنوات تكون الوثوقية كالآتي:

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\lambda 5} \\ &= 0.845 \\ e^{-5\lambda} &= 0.845 \\ -5\lambda &= ln(0.845) \\ &= -0.1684 \\ \lambda &= \frac{-0.1684}{-5} \\ &= 0.0337 \end{aligned}$$

مثال4-4 :

تم تشغيل عشرة آلاف قاطع دائرة زيتي جديد. معدل تعطلها ثابت ويبلغ 0.1 سنويًا. كم وحدة من أصل 10000 ستظل عاملة بعد 10 سنوات؟ وكم وحدة منها ستتعطل في السنة العاشرة؟

الحل: بصورة عامة ، احتمال ان تبقى الوحدات في العمل هي : $R(t) = e^{-\lambda t}$

احتمال البقاء على قيد العمل خلال 10 سنوات

$$R(10) = e^{-0.1 \times 10} = e^{-1.0} = 0.3679$$

من أصل 10,000 وحدة أصلية يجب أن تنجح 3679 وحدة (0.3679 × 10,000)

عدد حالات الفشل في السنة العاشرة = (عدد العاملين بعد السنة التاسعة) - (عدد العاملين بعد السنة العاشرة)

$$\begin{aligned} &= 10,000 \times e^{-0.1 \times 9} - 3679 \\ &= 1000 \times e^{-0.9} - 3679 \\ &= 4066 - 3679 = 387 \end{aligned}$$

مثال 4-5 :

تم تركيب 1000 مانعة صواعق. بافتراض أن معدل فشلها 0.05 سنويًا، كم عدد الوحدات (من الدفعة الأصلية) المتوقع تعطلها في السنة العاشرة من الخدمة؟

الحل:

عدد حالات الفشل في السنة العاشرة:

= ربع عدد الوحدات المتبقية في نهاية السنة التاسعة - عدد الوحدات المتبقية في نهاية السنة العاشرة

$$
\begin{aligned}
&= (e^{-\lambda 9} - e^{-\lambda 10}) \times 1000 \\
&= (e^{-0.45} - e^{-0.50}) \times 1000 \\
&= (0.6376 - 0.6065) \times 1000 \\
&= 31.1 \\
&\approx 31
\end{aligned}
$$

4-4 متوسط الزمن بين الأعطال MEAN TIME TO FAILURES

إن دالة الوثوقية الأسية exponential reliability function هي دالة كثافة احتمالية متصلة بالنسبة للزمن، وبالتالي توجد قيمة متوقعة لهذه الدالة يمكن اعتبارها متوسط القيمة الزمنية للدالة بأكملها. وبما أن دالة الوثوقية هي في الواقع دالة كثافة الأعطال، فإن متوسط الوقت لهذه الدالة هو متوسط الزمن اللازم لحدوث عطل، ويُعرف بمتوسط الزمن بين الأعطال (MTTF).

القيمة المتوقعة لدالة كثافة الاحتمالية تُعطى بالصيغة التالية:

$$E(x) = \int x f(x)\, dx$$

في حالتنا، يصبح هذا

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} t\lambda e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda$$

يمكن إثبات أن متوسط الزمن بين الأعطال (MTTF) يمكن الحصول عليه أيضًا من خلال مكاملة دالة الوثوقية على كامل المدى من 0 إلى مالانهاية ، أي

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

هذا يُبسط الحساب في معظم الحالات. بالنسبة للتوزيع الأسي البسيط، يصبح

$$\text{MTTF} = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda$$

يتبين أن متوسط الزمن بين الأعطال هو مقلوب معدل الأعطال. وهذه النتيجة صحيحة فقط لدوال الوثوقية الأسية. عليه فان احتمال الفشل من t = 0 إلى MTTF هو:

$$Q(\text{MTTF}) = 1 - e^{-\lambda/\lambda} = 1 - e^{-1} = 0.632$$

لذا، على الرغم من أن متوسط الزمن بين الأعطال (MTTF) هو متوسط الوقت اللازم لحدوث عطل، فإن احتمال حدوث عطل في الفترة الأولى من متوسط الوقت بين الأعطال هو 63.2% وليس 50%. وبالنسبة لمعدلات الأعطال المنخفضة، قد يكون متوسط الوقت بين الأعطال طويلًا جدًا، ويتجاوز بكثير العمر الافتراضي الطبيعي للنظام أو المعدات نفسها.

هذا ممكن لأن متوسط الوقت بين الأعطال (MTTF) هو متوسط الوقت المنقضي قبل حدوث عطل بشرط أن يكون الجهاز ضمن فترة عمره التشغيلي، فإذا كانت فترة العمر التشغيلي طويلة بما يكفي، قد يُلاحظ حدوث عطل، وإلا فقد يدخل الجهاز مرحلة التآكل قبل حدوث أي عطل، وعندها لن ينطبق مفهوم متوسط الزمن بين الأعطال. على سبيل المثال، قد يكون لمحول قدرة متوسط زمن بين الأعطال يبلغ 500 عام خلال فترة عمره التشغيلي، ولكن قد لا تتجاوز فترة عمره التشغيلي 60 عامًا، ويبدأ المحول في التعرض للأعطال بسبب التقادم بدلًا من الأعطال العشوائية.

مثال 4-6:

يوجد 10 مولدات في محطة توليد كهرباء. يُفترض أن معدل تعطل كل وحدة هو 0.02 سنويًا. ما هو متوسط الزمن بين الأعطال في تلك المحطة؟

الحل :

متوسط زمن الفشل $= \frac{1}{\lambda}$

$$\lambda_{\text{محطة}} = 10 \times 0.02 = 0.2 \text{ لكل سنة}$$

$$\text{MTTF}(\text{للمحطة}) = \frac{1}{0.2} = 5 \text{ سنوات}$$

5-4 وثوقية الأنظمة المعقدة

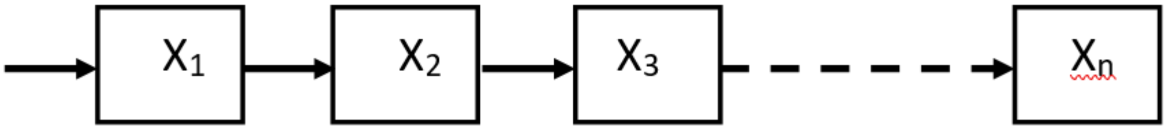
1-5-4 الأنظمة المرتبطة على التوالي (المتسلسلة)

تتكون معظم الأنظمة من أنظمة فرعية أو مكونات أو عناصر . وينطبق هذا على أشياء بسيطة مثل المصباح اليدوي، وصولاً إلى أشياء معقدة كالطائرة أو منظومات القدرة الكهربائية . من الناحية الوظيفية، تُرتّب هذه الأنظمة الفرعية أو المكونات في توصيلات تولٍ (متسلسلة) أو متوازية أو في تركيبات من الاثنين.

يشير مصطلح "التسلسل او التوالي" إلى العلاقة الوظيفية بين المكونات وليس إلى التوصيل المادي. يعني التوصيل التسلسلي أن كل مكون في التسلسل ضروري لكي يعمل النظام. تخطيطيًا، يجب المرور عبر كل عنصر للوصول من جانب الإدخال إلى جانب الإخراج كما هو موضح في الشكل4-4 .

لكل مكون في النظام معدل فشل وموثوقية خاصين به، ويعتمد معدل فشل النظام وموثوقيته على معدل فشل ووثوقية كل مكون على حدة. الوثوقية هي احتمال عمل المكون خلال فترة زمنية محددة، لذا فإن وثوقية النظام المتسلسل هي احتمال عمل كل مكون في وقت واحد خلال تلك الفترة الزمنية. إذا لم تكن أعطال المكونات مترابطة، فإن احتمال عمل جميع المكونات هو ببساطة حاصل ضرب احتمالات عمل كل مكون على حدة، وهو ما يُعرف بقانون ضرب الاحتمالات.

تتكون منظومات القدرة الكهربائية من أنظمة فرعية أو مكونات. وظيفيًا، تُرتّب هذه الأنظمة الفرعية أو المكونات على التوالي أو التوازي أو مزيج منهما. في حالة التوصيل على التوالي، يجب أن يعمل كل مكون لضمان نجاح المنظومة . لنفترض نظامًا مكونًا من n مكونًا، X1، X2، X3، ...، Xn، كما هو موضح في الشكل4-4 .



الشكل4-4 . توصيل المكونات أو العناصر على التوالي.

إن احتمالية نجاح النظام هي

$$P(S) = P(X_1 \cap X_2 \cap X_3 \cap \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots . \cap X_n)$$

أو

$$P(S) = P(X_1).P(X_2).P(X_3) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots . P(X_n)$$

لتكن $R_1(t)$ هي وثوقية X_1 = احتمال نجاح $= P(X_1)$

$P(X_2) =$ احتمال نجاح X_2 = وثوقية R_2(t)

$P(X_3) =$ احتمال نجاح X_3 = وثوقية R_3(t)

. . . .

$P(X_n) =$ احتمال نجاح X_n = وثوقية R_n(t)

$$R_{\text{system}}(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times \cdots \times R_n(t)$$

أو بصورة عامة
$$R_{syst}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i\,(t)$$

إذا كانت احتمالات فشل المكونات أسية مع معدلات فشل مقابلة، λ1، λ2، λ3، وهكذا، فإن وثوقية النظام تكون :

$$R_{\text{system}} = e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 t} \times e^{-\lambda_3 t} \times \cdots \times e^{-\lambda_n t}$$
$$= e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \cdots + \lambda_n)t}$$

ان مجموع $(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \cdots + \lambda_n)$ هو ثابت. وهو معدل الفشل المركب للنظام المتسلسل. ومن معدل فشل النظام λ ، يمكن حساب متوسط الزمن بين حالات الفشل للنظام:

$$\text{MTTF}_{\text{system}} = 1/\lambda$$

2-5-4 الأنظمة المرتبطة على التوازي (المتوازية)

يعني النظام المتوازي، من منظور الوثوقية، أن يعمل مكون واحد فقط من مكونات التوصيلات المتوازية لكي يعمل النظام. لنفترض نظامًا مكونًا من n مكونًا، X1، X2، X3، ...، Xn، موصولة على التوازي كما هو موضح في الشكل 4-5 .

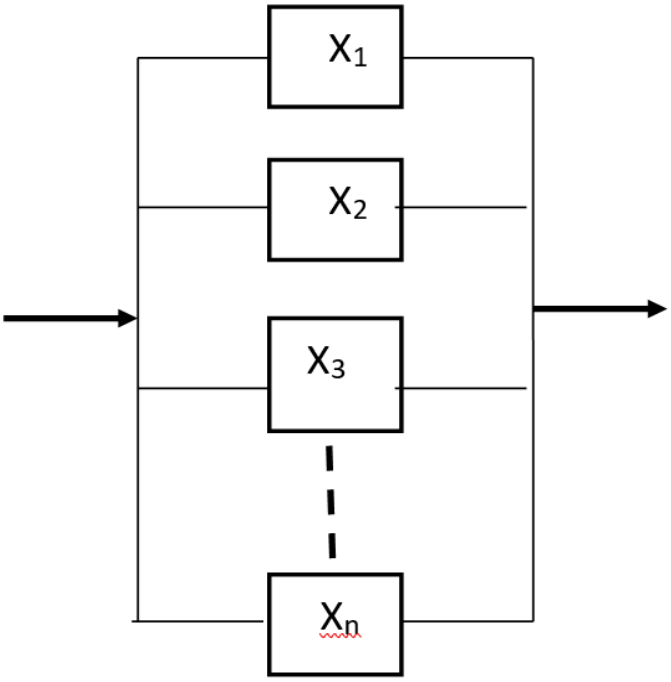
احتمالية نجاح النظام هي

$$P(S) = P(X_1 \cup X_2 \cup X_3 \cup \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \cup X_n)$$

$$P(f) = P(\overline{S})$$

$$P(f) = P(\overline{X_1} \cap \overline{X_2} \cap \overline{X_3} \cap \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \cap \overline{X_n})$$

$$P(f) = P(\overline{X_1}).P(\overline{X_2}).P(\overline{X_3}) \dots\dots\dots\dots\dots\dots.P(\overline{X_n})$$



الشكل 4-5 التوصيل على التوازي.

حيث $P(\overline{X_i})$ = احتمال فشل المكون رقم i $= Q_i(t)$

بما أن عنصرًا واحدًا فقط في توصيل التوازي مطلوب لعمل النظام، فإن العناصر الأخرى زائدة. هذه الزيادة في عدد العناصر هي ما يجعل وثوقية النظام عالية، لأنه لكي يتعطل النظام، يجب أن تتعطل جميع العناصر في التوصيل التوازي. فإذا كانت الأعطال مستقلة، فإن احتمال تعطلها جميعًا يساوي حاصل

$$Q(t)_{\text{system}} = Q_1(t) \times Q_2(t) \times Q_3(t) \times \cdots \times Q_n(t)$$

ضرب احتمالات تعطل جميع العناصر الفردية. وإذا كان Q(t) هو احتمال التعطل في فترة زمنية معينة، أي عدم الوثوقية، فإن

أو بصورة عامة

$$Q_{syst}(t) = \prod_{i=1}^{n} Q_i\,(t)$$

وإذا كانت جميع العناصر لها نفس Q(t) :

$$\begin{aligned} Q(t)_{\text{system}} &= Q^n(t) \\ R(t)_{\text{system}} &= 1 - Q(t)_{\text{system}} \end{aligned}$$

وإذا كانت جميع عناصر النظام المتوازي لها معدلات فشل ثابتة، وبالتالي دوال موثوقية أسية، كما هو مفترض عادةً، فإن موثوقية النظام المتوازي ستكون:

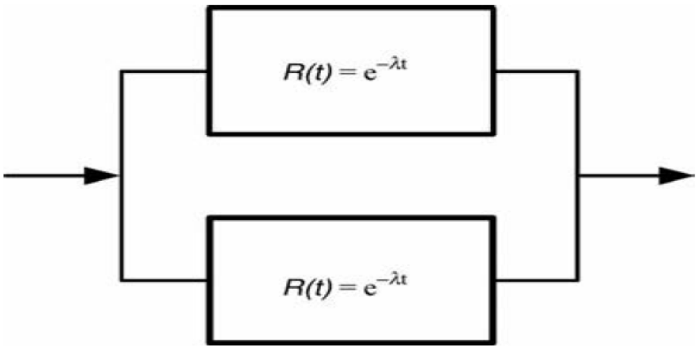
$$\begin{aligned} Q_{\text{system}}(t) &= Q(t)^n \\ R(t)_{\text{system}} &= 1 - Q(t)_{\text{system}} \\ &= 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t}) \times (1 - e^{-\lambda_2 t}) \times (1 - e^{-\lambda_3 t}) \cdots (1 - e^{-\lambda_n t}) \end{aligned}$$

وإذا كانت جميع قيم λ متساوية

$$R(t)_{\text{system}} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n$$

لا تعتمد وثوقية هذا النظام على دالة أسية كما هو الحال في الأنظمة المتسلسلة. وبالتالي، فإن معدل فشل نظام التوازي ليس ثابتًا، بل يتغير مع الزمن. أما متوسط زمن الفشل، فيظل ثابتًا. من الواضح أن العلاقة MTTF = 1/λ لم تعد صحيحة. لتوضيح ذلك، لنفترض وجود وحدتين متطابقتين موصولتين على التوازي كما هو موضح في الشكل4-6 .

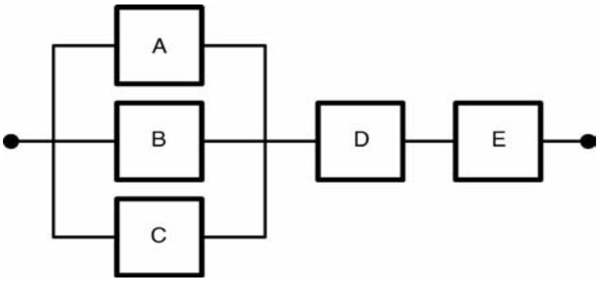
$$\begin{aligned} \text{وثوقية النظام} &= 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2 \\ &= 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \end{aligned}$$



الشكل4-6 . توصيل توازٍ لمكونات متماثلة.

مثال4-7:

ما مدى وثوقية النظام الموضح في الشكل 4- 7؟



الشكل4-7. نظام متصل على التوازي والتوالي.

حيث أن

$$R(t)_A = R(t)_B = R(t)_C = 0.7$$

$$R(t)_D = 0.90$$

$$R(t)_E = 0.80$$

الحل :

وثوقية المنظومة

$$= R(t)_{A//B//C} \times R(t)_D \times R(t)_E$$

$$= (1 - Q(t)_A \times Q(t)_B \times Q(t)_C) \times R(t)_D \times R(t)_E)$$

$$\begin{aligned} Q(t)_A = Q(t)_B = Q(t)_C &= 1 - R(t)_A \\ &= 1 - 0.7 \\ &= 0.3 \end{aligned}$$

$$R(\text{system}) = (1 - 0.3 \times 0.3 \times 0.3) \times (0.90) \times (0.80) = 0.701$$

$$\text{معدل عطل النظام} = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

$$= \frac{2\lambda(e^{-\lambda t} - 1)}{e^{-\lambda t} - 2}$$

$$\text{MTTF للنظام} = \int_0^\infty R(t)dt$$

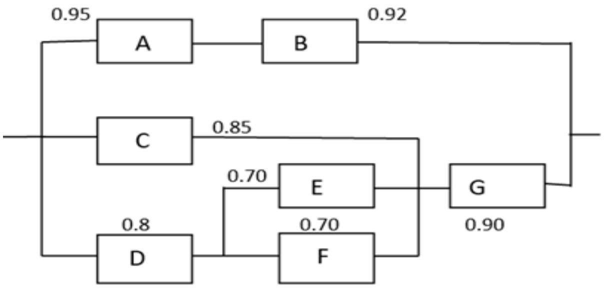
$$= \frac{3}{2\lambda} \quad \text{وهو كمية ثابتة}$$

بشكل عام، عندما تكون n وحدة متطابقة متصلة على التوازي،

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \cdots + \frac{1}{n\lambda}$$

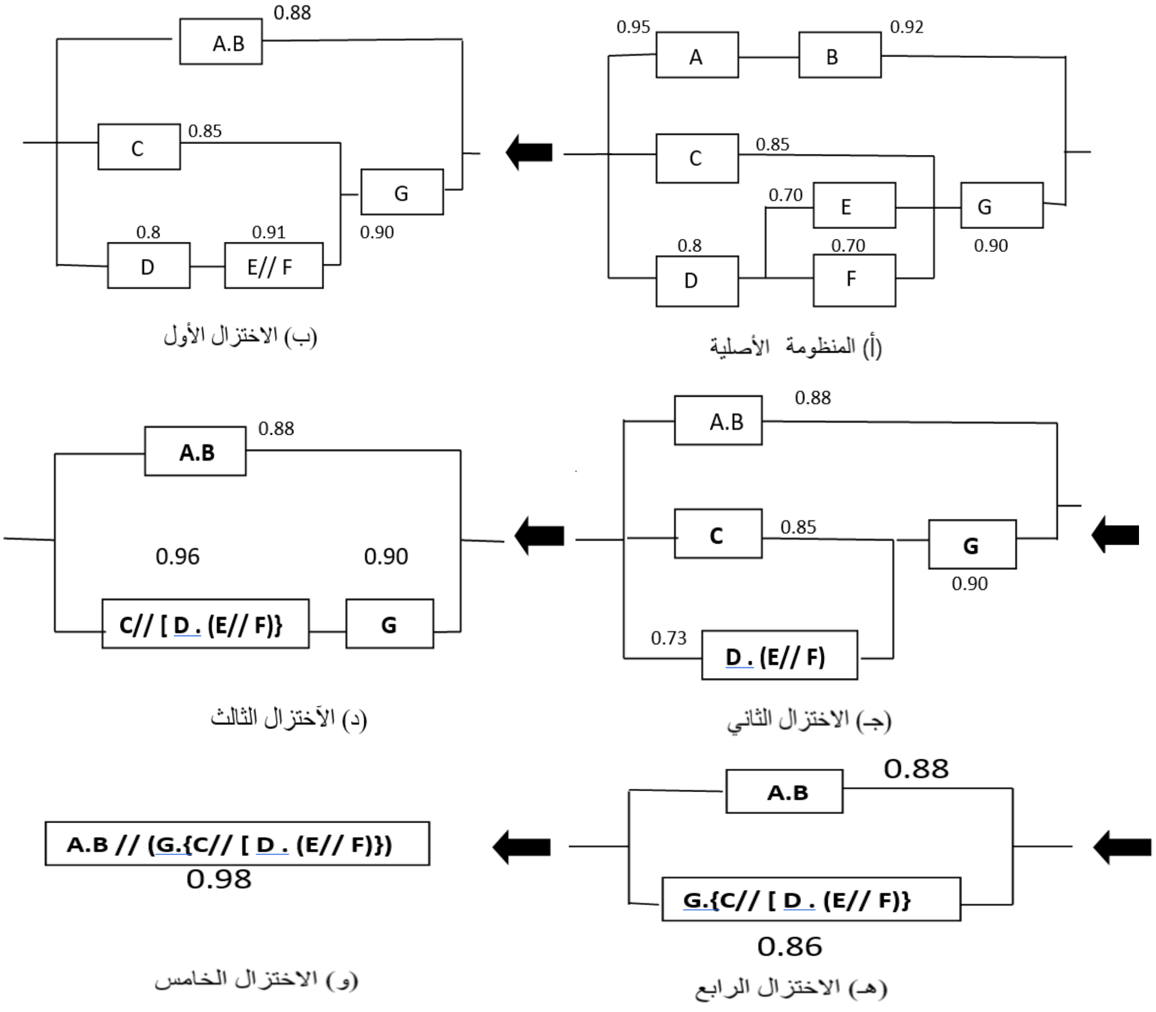
3-5-4 وثوقية الأنظمة المتصلة على التوالي والتوازي

في تقييمات الوثوقية للأنظمة المترابطة المعقدة نوعاً ما، نقوم بتقليل التكوينات المعقدة عن طريق دمج الفروع المتصلة على التوالي والتوازي المناسبة في النموذج حتى يتبقى عنصر مكافئ واحد. يُطلق على هذا النهج اسم طريقة الاختزال المتتالي. فعلى سبيل المثال، انظر إلى البنية الموضحة في الشكل 4-8 ، حيث تُبين المخططات في الشكل 4-9 خطوات الإختزال من (أ) إلى (و).



الشكل 4-8.

الحل:



الشكل 4-9 خطوات الإختزال من (أ) إلى (و) لحساب موثوقية النظام.

6-4 نموذج التوافرية Availability Model

عندما يتعطل نظام ما، فإنه سيتوقف عن العمل لفترة من الوقت حتى يتم إصلاحه أو استبداله. حتى بالنسبة للأنظمة التي تحتوي على وحدات احتياطية، قد يتوقف النظام عن العمل إذا حدث عطل ولم تكن هناك وحدات احتياطية متاحة. تُسمى النسبة المئوية للوقت الذي يعمل فيه النظام بتوافر النظام، وعادةً ما يتم التعبير عنها كالتالي:

$$\text{التوافرية } A = \frac{\text{مجموع ساعات العمل في سنة واحدة}}{8760}$$

وتُسمى النسبة المئوية للوقت الذي لا يعمل فيه النظام بعدم توافرالنظام أو اللاتوافرية Unavailability ، وعادةً ما يتم التعبير عنها كالتالي:

$$\text{اللاتوافرية } \bar{A} = \frac{\text{مجموع ساعات العطل في سنة واحدة}}{8760}$$

بما أن متوسط الفترة الزمنية اللازمة لتعطل النظام يساوي متوسط الوقت بين الأعطال ($MTTF$)، ومتوسط الوقت اللازم لعودته إلى العمل يساوي متوسط وقت الإصلاح ($MTTR$)، فإن التوافر، الذي يُعرَّف بأنه وقت التشغيل / (وقت التشغيل + وقت التوقف)، ويمكن التعبير عنه أيضاً كما يلي:

$$A = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}}$$

ويمكن التعبير عن اللاتوافرية (عدم التوفر) على النحو الآتي:

$$\bar{A} = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}}$$

بالنسبة للأنظمة التي يمكن التعامل معها كمكون واحد بمعدل فشل ثابت λ ومعدل إصلاح ثابت μ، فإن التوافرية تكون :

$$A = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

واللاتوافرية تكون :

$$\bar{A} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

7-4 متوسط وقت الإصلاح

عندما يتعطل جهاز أو نظام، يصبح خارج الخدمة. إلى حين إصلاحه أو استبداله بوحدة أخرى، لن تكون الخدمة متاحة للمستخدم. حتى في حال توفر وحدات احتياطية، وسيستغرق الاستبدال بعض الوقت. يُطلق على الوقت اللازم لاستعادة الخدمة، سواءً بالإصلاح أو الاستبدال، اسم "وقت الإصلاح".

على الرغم من أن الأعطال تُعتبر عمومًا أحداثًا لحظية، بينما تُعدّ الإصلاحات عمليات مستمرة خلال فترة الإصلاح، إلا أنهما متماثلان لأغراض التحليل. ينقل العطل الوحدة من حالة "تشغيل" إلى حالة "تعطل"، ويستغرق في المتوسط متوسط الزمن بين الأعطال (MTTF) لحدوث ذلك. ينقل الإصلاح الوحدة من حالة "تعطل" إلى حالة "تشغيل"، ويستغرق في المتوسط متوسط وقت الإصلاح (MTTR) لإتمام ذلك. معدل الأعطال هو مقلوب متوسط الوقت بين الأعطال؛ وبالمثل، يمكن تعريف معدل الإصلاح r على أنه مقلوب وقت الإصلاح.

كذلك، وكما يؤدي معدل الفشل الثابت إلى احتمالية فشل أسية، فإن معدل الإصلاح الثابت يؤدي إلى دالة إصلاح أسية. وهذا يعني أن احتمالية إصلاح المعدات خلال فترة زمنية t تُعطى بدالة أسية، على الرغم من أن زمن الإصلاح على المدى الطويل ثابت. وهذا أمر منطقي تمامًا، إذ تتطلب أنواع الأعطال المختلفة أزمنة إصلاح مختلفة.

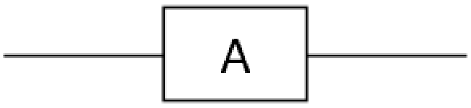
يُضفي إدخال عملية الإصلاح ديناميكية حقيقية على النظام، لأن تدفع قوتان متضادتان، هما الفشل والإصلاح، النظام ذهابًا وإيابًا بين حالتي التشغيل والتوقف. في الواقع، ولا تقتصر الأنظمة على حالتي التشغيل والتوقف فقط؛ بل لها حالات متعددة نتيجةً لفشل عدد من الوحدات (x) من أصل عدد من الوحدات (n)، وتوفير قطع الغيار، وتخفيض قدرة بعض المعدات، والعديد من العوامل الأخرى. قد يكون التحليل معقدًا للغاية، لكن مبدأ معدلات الفشل ومعدلات الإصلاح التي تؤدي من حالة إلى أخرى لا يزال ساريًا.

8-4 تقييم وثوقية الشبكات باستخدام نظرية المجموعات

Network’s reliability evaluation using set theory

1- شبكة ذات عنصر واحد:

لنفترض وجود عنصر واحد A كما هو موضح في الشكل الشكل 4-10 .



الشكل 4-10 شبكة ذات عنصر واحد.

بالنسبة لهذا العنصر،

احتمالية النجاح

$$P(S) = P(A) = Pa$$

حيث يكون العنصر متاحًا.

أما احتمالية الفشل

$$P(f) = 1 - P(A) = Qa$$

حيث يكون العنصر غير متاح.

2. شبكة مكونة من عنصرين

(أ) بالنسبة لعنصرين موصولين على التوالي كما في الشكل 4-11:

الشكل 4-11.

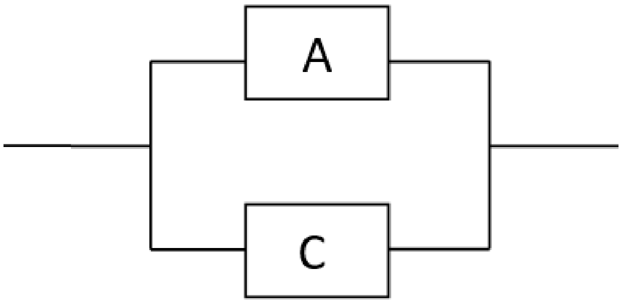
توافرية الشبكة هو:

$$P(S) = P(A \cap B) = P_a \,.P_b = P_{\text{توالي}}$$

عدم توافرية الشبكة هو:

$$P(f) = P(\bar{A} \cup \overline{B)} = Q_a + Q_b - Q_a . Q_b = Q_{\text{توالي}}$$

(ب) بالنسبة لعنصرين متصلين على التوازي كما في الشكل 4-12 :



الشكل 4-12.

توافرية الشبكة هي:

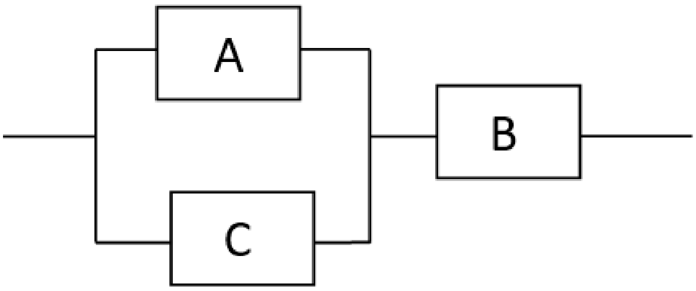
$$P(S) = P(A \cup C) = P_a + \ P_c - P_a . P_c = P_{\text{توازي}}$$

عدم توافرية الشبكة هو:

$$P(f) = P(\overline{A} \cap \overline{C}) = Q_a . Q_c = Q_{\text{توازي}}$$

3- شبكة ذات ثلاثة عناصر:

(أ) لنفترض حالة شبكة ثلاثية العناصر كما هو موضح أدناه في الشكل 4-13 :



الشكل 4-13 .

توافرية الشبكة هي:

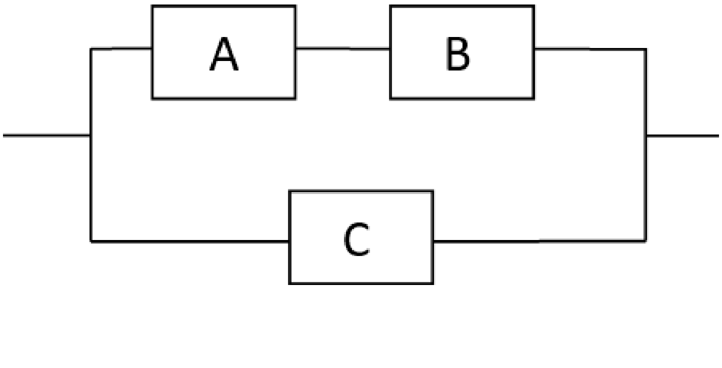
$$P(S) = P[(A \cup C) \cap B] = P[(A \cap B) \cup (C \cup B)] = P_a P_b + P_c P_b - P_a P_b P_c$$

عدم توافرية الشبكة هو:

$$P(f) = P[\overline{(A \cup C) \cap B}\ ] = 1 - (P_a P_b + P_c P_b - P_a P_b P_c)$$

$$= 1 - P_a P_b - P_c P_b + P_a P_b P_c)$$

(أ) إذا أعيد توصيل نفس شبكة العناصر الثلاثة كما هو موضح أدناه في الشكل 4-14:



الشكل 4-14.

توافرية الشبكة هي:

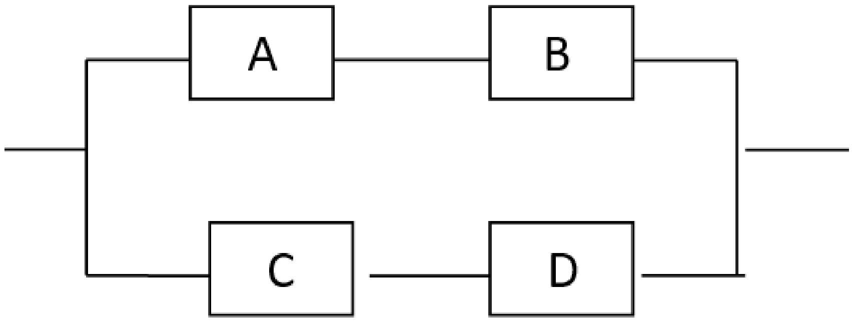
$$P(S) = P[(A \cap B) \cup C] = P_a P_b + P_c - P_a P_b P_c$$

عدم توافرية الشبكة هو:

$$P(f) = P[\overline{(A \cap B) \cup C}\ ] = 1 - P_a P_b - P_c + P_a P_b P_c$$

4- شبكة مكونة من أربعة عناصر:

(أ) حالة توصيل العناصر الأربعة كما هو موضح أدناه في الشكل 4-15 :



الشكل 4-15.

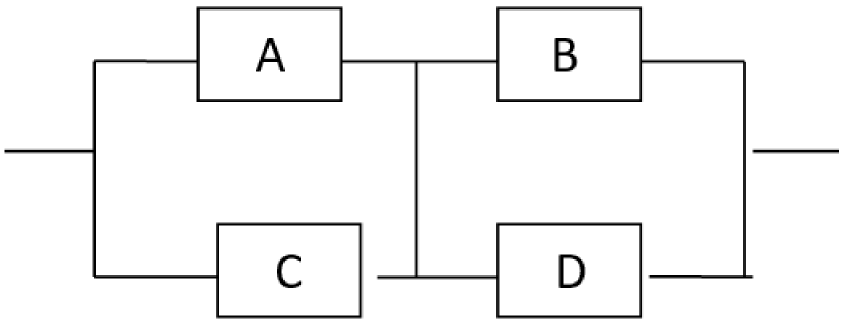
توافرية الشبكة هي:

$$P(S) = P[(A \cap B) \cup (C \cap D)] = P_a P_b + P_c P_d - P_a P_b P_c P_d$$

عدم توافرية الشبكة هو:

$$P(f) = P[\overline{(A \cap B) \cup (C \cap D)}\ ] = 1 - P_a P_b - P_c P_d + P_a P_b P_c\, P_d$$

(ب) الحالة التي تكون فيها العناصر الأربعة متصلة كما هو موضح أدناه في الشكل 4-16:



الشكل 4-16.

توافرية الشبكة هي:

$$P(S) = P[(A \cup C) \cap (B \cup D)] = (P_a + P_c - P_a . P_c).(P_b + P_d - P_b P_d)$$
$$= P_a P_b + P_a P_d + P_c P_d - P_a P_b P_d + P_c P_b - P_a P_b P_d - P_a P_c P_d$$
$$- P_a P_b P_c + P_a P_b P_c\, P_d$$

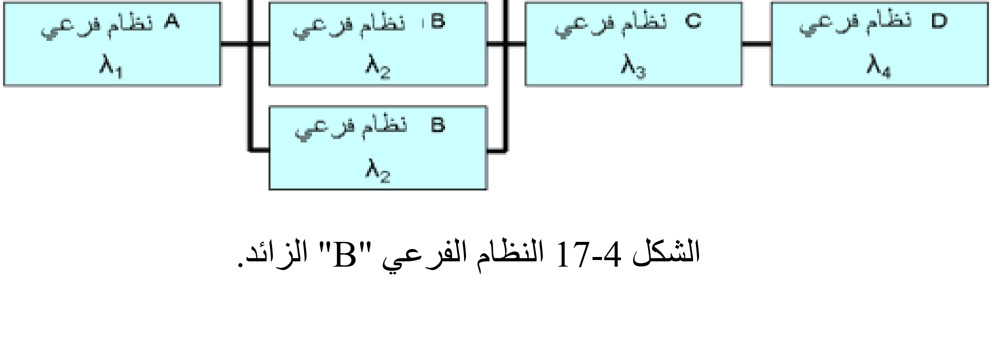
عدم توافرية الشبكة هو:

$$P(f) = P[\overline{(A \cup C) \cap (B \cup D)}\ ]$$
$$= 1 - P_aP_b - P_aP_d - P_cP_d + P_aP_bP_d - P_cP_b + P_aP_bP_d + P_aP_cP_d + P_aP_bP_c - P_aP_bP_c\,P_d$$

9-4 التكرارية (المكونات الإحتياطية الإضافية) Redundancy

في الهندسة ونظرية النظم، يقصد بالتكرارية هو التكرار المتعمد للمكونات أو الوظائف الحيوية للنظام بهدف زيادة وثوقية النظام، وعادة ما يكون ذلك في شكل نسخة احتياطية أو نظام أمان ضد الأعطال، أو لتحسين أداء النظام الفعلي، كما هو الحال في أجهزة الاستقبال والملاحة والتوجيه في الأقمار الصناعية Global navigation satellite system (GNSS)، أو في معالجات الكمبيوتر متعددة الخيوط Multithreading computer وأجهزة القدرة اللامنقطعة UPS في المطارات والمستشفيات لتغذية الأحمال الحرجة وغيرها.

كذلك في العديد من الأنظمة بالغة الأهمية للسلامة، مثل أنظمة التحكم الإلكتروني وأنظمة الهيدروليك في الطائرات، قد تُكرر بعض أجزاء نظام التحكم ثلاث مرات، وهو ما يُعرف رسميًا بالتكرار المعياري الثلاثي (TMR). في هذه الحالة، يُمكن التغلب على خطأ في أحد المكونات من خلال اختيار المكونين الآخرين. في النظام ذي التكرار الثلاثي، يتكون النظام من ثلاثة مكونات فرعية، ويجب أن تتعطل جميعها قبل أن يتعطل النظام بأكمله. نظرًا لأن كل مكون نادرًا ما يتعطل، ولأن المكونات الفرعية مصممة لمنع أنماط الأعطال الشائعة (والتي يُمكن نمذجتها كأعطال مستقلة)، فإن احتمال تعطل المكونات الثلاثة يُحسب على أنه ضئيل للغاية؛ وغالبًا ما تفوقه عوامل الخطر الأخرى، مثل الخطأ البشري. تُعد الارتفاعات المفاجئة في التيار الكهربائي الناتجة عن الصواعق مثالًا على نمط عطل يصعب عزله تمامًا، إلا إذا كانت المكونات تعمل من خطوط طاقة مستقلة ولا يوجد مسار كهربائي مباشر في وصلاتها البينية.



الشكل 4-17 النظام الفرعي "B" الزائد.

قد يؤدي التكرار أحيانًا إلى انخفاض الوثوقية بدلًا من زيادتها، إذ يُنشئ نظامًا أكثر تعقيدًا وعرضةً لمشاكل متنوعة، وقد يُفضي إلى إهمال الأفراد لواجباتهم، وإلى زيادة متطلبات الإنتاج، مما قد يُؤدي إلى إجهاد النظام ويجعله أقل أمانًا. ويُعدّ التكرار أحد أشكال المتانة كما هو مُطبّق في علوم الحاسوب أيضاً.

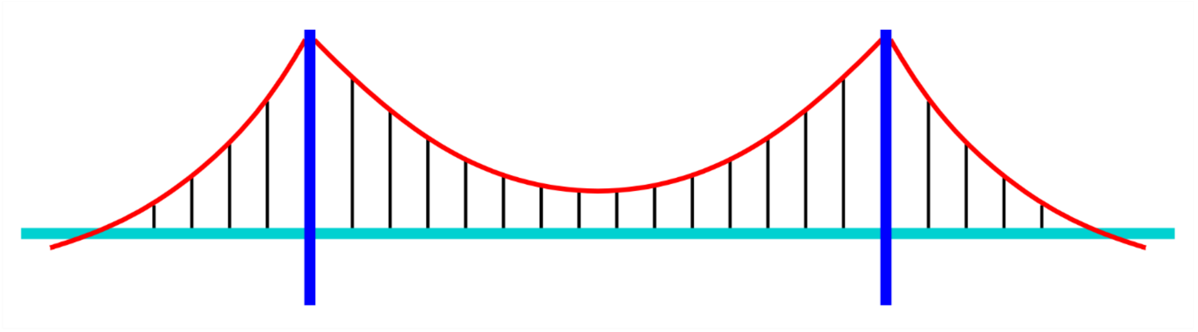
1-9-4 أنواع التكرارية

يُمكن تطبيق وظيفتين أساسيتين للتكرارية:

- التكرارية السلبية (الهامدة) Passive redundancy وتسمى أيضاً في بعض المراجع بالتكرارية الباردة Cold redundancy
- والتكرارية الفعالة Active redundancy وتسمى أيضاً في بعض المراجع بالتكرارية الحارة Hot redundancy .

تعمل كلتا الوظيفتين على منع انخفاض الأداء من تجاوز حدود المواصفات دون تدخل بشري، وذلك باستخدام سعة إضافية. يُعد التكرار الفعال او النشط مفهومًا تصميميًا يزيد من الجاهزية التشغيلية ويقلل من تكلفة التشغيل عن طريق أتمتة معظم إجراءات الصيانة الحرجة.

يستخدم التكرار السلبي السعة الزائدة لتقليل تأثير أعطال المكونات. ومن الأمثلة الشائعة على التكرار السلبي، زيادة قوة الكابلات والدعامات المستخدمة في الجسور. تسمح هذه القوة الإضافية لبعض المكونات الهيكلية بالتعطل دون انهيار الجسر. تُسمى هذه القوة الإضافية المستخدمة في التصميم بهامش الأمان.انظر الشكل 4-18.



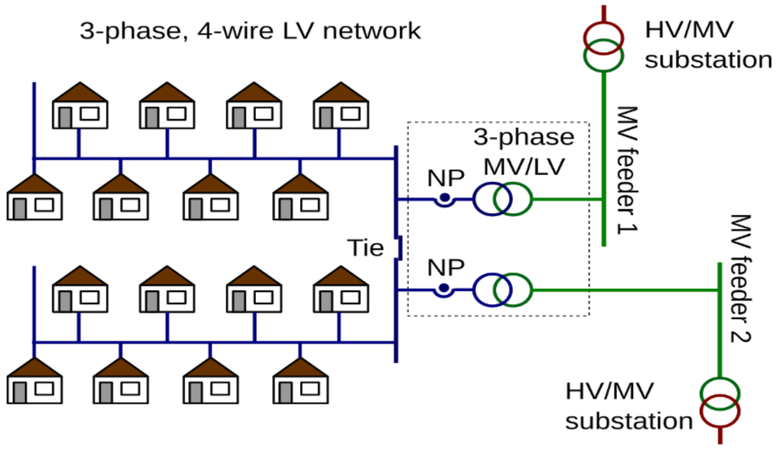
الشكل 4-18 تُعدّ الكابلات العديدة في الجسر المعلق شكلاً من أشكال التكرار.

وتُعدّ العينان والأذنان مثالين عمليين على التكرار السلبي. لا يُسبب فقدان البصر في إحدى العينين العمى، ولكنه يُضعف إدراك البصر البعيد. ولا يُسبب فقدان السمع في إحدى الأذنين الصمم، ولكنه يُضعف القدرة على تحديد اتجاه الصوت. يرتبط انخفاض الأداء عادةً بالتكرار السلبي عند حدوث عدد محدود من الأعطال.

تُزيل خاصية التكرار الفعال النشط انخفاض الأداء من خلال مراقبة أداء الأجهزة الفردية، وتُستخدم هذه المراقبة في منطق الإختيار. يرتبط منطق الإختيار بعملية تبديل تُعيد تكوين المكونات تلقائيًا. يُعدّ اكتشاف الأخطاء وتصحيحها ونظام تحديد المواقع العالمي (GPS) مثالين على التكرار النشط.

يُقدّم توزيع الطاقة الكهربائية مثالًا على التكرار النشط. تربط عدة خطوط طاقة كل محطة توليد بالمستهلكين. يحتوي كل خط طاقة على أجهزة مراقبة لكشف الأحمال الزائدة، بالإضافة إلى قواطع دوائر كهربائية. يُوفّر هذا الترابط بين خطوط الطاقة سعةً فائضة. تفصل قواطع الدوائر الكهربائية خط الطاقة عند اكتشاف أجهزة المراقبة حملاً زائدًا، ثم يُعاد توزيع الطاقة عبر الخطوط المتبقية. في مطار تورنتو، توجد 4 خطوط كهربائية احتياطية. يُزوّد كل خط من الخطوط الأربعة المطار بأكمله بالطاقة الكافية. وتستخدم محطة ثانوية للشبكة نقاطًا مؤقتة لترحيل التيار العكسي لفتح قواطع الدوائر الكهربائية للخطوط المعطلة، مع السماح باستمرار تدفق الطاقة إلى المطار.

في شبكات توزيع الكهرباء، تُستخدم محطات الشبكة الثانوية (محولات الشبكة) في شبكات التوزيع المترابطة. تتكون هذه المحطات من شبكة ثانوية (تُسمى أيضًا شبكة التوزيع الرئيسية) حيث يتم توصيل جميع محولات التغذية معًا في موقع واحد على الجانب الثانوي. تُعتبر الشبكات الفرعية الترتيب الأكثر وثوقية ومرونة لتوصيل الطاقة لجميع أنواع الأحمال. ويمكن إجراء عمليات التحويل دون انقطاع التيار الكهربائي عن الأحمال.



الشكل 4-19 تخطيط موضعي لشبكة فولتية منخفضة .

كما تستخدم أنظمة الطاقة الكهربائية جدولة الطاقة لإعادة تهيئة التكرار النشط. تقوم أنظمة الحوسبة بتعديل إنتاج كل محطة توليد عند فقدان محطات توليد أخرى فجأة. وهذا يمنع انقطاع التيار الكهربائي أثناء الكوارث الكبرى مثل الزلازل.

2-9-4 عيوب التكرارية

يقول تشارلز بيرو، مؤلف كتاب "الحوادث العادية"، إن التكرار في بعض الأحيان يأتي بنتائج عكسية، فيؤدي إلى انخفاض الوثوقية بدلاً من زيادتها. وقد يحدث هذا بثلاث طرق: أولاً، تؤدي أجهزة السلامة الزائدة إلى نظام أكثر تعقيداً، وأكثر عرضة للأخطاء والحوادث. ثانياً، قد يؤدي التكرار إلى تهرب العمال من المسؤولية. ثالثاً، قد يؤدي التكرار إلى زيادة ضغوط الإنتاج، مما ينتج عنه نظام يعمل بسرعات أعلى، ولكن بأمان أقل.

حساب احتمالية تعطل النظام

إن كل مكون مكرر يُضاف إلى النظام يُقلل من احتمالية تعطل النظام وفقًا للمعادلة التالية:

$$p = \prod_{i=1}^{n} p_i$$

حيث:

n – عدد المكونات

p_i – احتمالية تعطل المكون i

p – احتمالية تعطل جميع المكونات (تعطل النظام)

تفترض هذه الصيغة استقلالية أحداث الفشل. أي أن احتمالية تعطل المكون B إذا كان المكون A قد تعطل بالفعل هي نفسها احتمالية تعطل B إذا لم يتعطل A. توجد حالات يكون فيها هذا الافتراض غير منطقي، مثل استخدام مصدرَي طاقة متصلين بنفس المقبس بحيث إذا تعطل أحدهما، فسيتعطل الآخر أيضًا.ويفترض ذلك أيضاً أن هناك حاجة إلى مكون واحد فقط للحفاظ على تشغيل النظام.

3-9-4 التكرار والتوافر العالي

يمكنك تحقيق توافر أعلى من خلال التكرار. لنفترض أن لديك ثلاثة مكونات زائدة: A، B،C. يمكنك استخدام الصيغة التالية لحساب توافر النظام ككل:

توافر المكونات الزائدة = 1 - (1 - توافر المكون A) × (1 - توافر المكون B) × (1 - توافرالمكون C)

وبالتالي، إذا كان لديك N مكونًا متوازيًا، لكل منها توافر X، فإن:

توافر المكونات المتوازية = 1 - (1 -X)^N

ويُمكن استخدام المكونات الاحتياطية لزيادة توافر النظام بشكل كبير. على سبيل المثال، إذا كان توافر كل مضيف لديك 50% فقط، فباستخدام 10 مضيفات بالتوازي، يُمكنك تحقيق توافر بنسبة 99.9023%. وتجدر الإشارة إلى أن التكرار لا يؤدي دائمًا إلى زيادة التوافر. في الواقع، يزيد التكرار من التعقيد، مما يُقلل بدوره من التوافر. وللاستفادة من التكرار، يجب التأكد مما يلي:

- تحقيق تحسن إيجابي صافٍ في التوافر الإجمالي للنظام
- تعطل مكوناتك الاحتياطية بشكل مستقل
- قدرة النظام على اكتشاف المكونات الاحتياطية السليمة بشكل موثوق
- قدرة النظام على توسيع نطاق المكونات الاحتياطية وتقليصه بشكل موثوق.

تركيبات أنظمة الطاقة غير المنقطعة الثابتة. التشغيل المتوازي.

Static UPS installations. Parallel operation.

- التشغيل المتوازي الاحتياطي Redundant parallel operation

يتكون نظام UPS المتوازي من وحدتين إلى ست وحدات UPS متصلة بالتوازي، حيث يتم توزيع الحمل بالتساوي.

تحتوي كل وحدة على دائرة تجاوز ثابتة (SB) خاصة بها، مما يضمن وجود دائرة تجاوز احتياطية redundancy في النظام.

هذا يعني أنه في حال تعطل إحدى دوائر التجاوز الثابتة، يظل نظام التجاوز متاحًا دائمًا.

لا يحتوي النظام المتوازي على وحدة تحكم مركزية.

تحتوي كل وحدة على إلكترونيات توازي منفصلة لمراقبة جميع الوظائف وتوفير التكرار الكامل full redundancy.

10-4 الأنظمة ذات التكرار الجزئي Partially Redundant Systems

إذا كان النظام يتطلب x مكونًا من أصل n لكي يعمل، وكانت جميع هذه المكونات ذات معدلات فشل متطابقة، ولم يُفرّق بين المكونات الفردية فإن وثوقية النظام ككل تُحدد بتطبيق توزيع الاحتمال ذي الحدين.

لتكن :

وثوقية كل مكون R.

عدم الموثوقية = 1-R

$$(R(t)+Q(t))^n = R(t)^n + n\,R(t)^{n-1}Q(t) + nC_2R(t)^{n-2} + \cdots + n\,R(t)Q(t)^{n-2} + Q(t)^n$$

إذا كان مطلوبًا أن تعمل جميع المكونات n لكي يعمل النظام (أي نظام متسلسل)،

الحد الأول من المتسلسلة $R(t)_{\text{system}} = R(t)^n$

إذا كانت هناك حاجة إلى (n-1) مكون من أصل n،

الحدين الأولين من المتسلسلة

$$R(t)_{\text{system}} = R(t)^n + n\,R(t)^{n-1}Q(t)$$

بشكل عام، إذا كانت هناك حاجة إلى x مكونات من أصل n،

$$R(t)_{\text{system}} = R(t)^n + n\,R(t)^{n-1}Q(t) + nC_2R(t)^{n-2}Q(t)^2 + \cdots + nC_{n-x}R(t)^xQ(t)^{n-x}$$

أي حتى الحد الذي يحتوي على $R(t)^x$.

إذا كان مطلوبًا مكون واحد فقط من بين n مكونًا لكي يعمل النظام (أي نظام متوازٍ)،

$$\begin{aligned} R(t)_{\text{system}} &= R(t)^n + n\,R(t)^{n-1}\,Q(t) + \cdots + n\,R(t)\,Q(t)^{n-1} \\ &= (R(t)+Q(t))^n - Q(t)^n \\ &= 1 - Q(t)^n \end{aligned}$$

لذا، فإنّ مفكوك ذات الحدين لـ $(R(t)þQ(t))^n$ هو التعبير الأكثر عمومية الذي يشمل كلاً من الأنظمة المتسلسلة والمتوازية. ينبغي اختزال الأنظمة الأكثر تعقيدًا إلى تركيبات أبسط كلما أمكن ذلك، وتحليلها بالتتابع. لذا، فإنّ مفكوك ذات الحدين لـ $(R(t) + Q(t))^n$ هو التعبير الأكثر عمومية الذي يشمل كلاً من الأنظمة المتسلسلة والمتوازية. ينبغي اختزال الأنظمة الأكثر تعقيدًا إلى تركيبات أبسط كلما أمكن ذلك، وتحليلها بالتتابع.

11-4 نظرية باي Bay’s Theorem

تتكون بعض الأنظمة من أنظمة فرعية مختلفة متصلة بطرق ليست متسلسلة ولا متوازية ولا زائدة جزئيًا. ومع ذلك، إذا أمكن إنشاء مخطط تخطيطي لهذا النظام، ومعرفة موثوقية المكونات الفردية، فيمكن تحليل هذا النظام باستخدام نظرية بايز. في سياق الموثوقية، يمكن صياغتها على النحو التالي:

في ظل الشرط 1

$$R(\text{نظام}) = R(\text{تحت الشرط 1}) \times P(\text{الشرط 1}) + R(\text{تحت الشرط 2}) \times P(\text{الشرط 2})$$
$$+ R(\text{تحت الشرط 3}) \times P(\text{الشرط 3}) + \cdots \ldots \ldots ..$$

بشرط أن

$$P(\text{الشرط 1}) + P(\text{الشرط 2}) + P(\text{الشرط 3}) + \cdots \ldots . = 1$$

(أي، استُنفدت جميع الاحتمالات)

ملاحظة: تم حذف وظيفة الزمن؛ أي أن R(t) تُعبَّر عنها كـ R لفترة زمنية محددة لمهمة معينة

في معظم التطبيقات، يوجد شرطان فقط: الشرط الأول هو أن يكون عنصر معين X سليمًا، والشرط الثاني هو أن يكون العنصر X رديئاً. وبهذه الطريقة، يُمكن التركيز على مُكوِّن حرج في نظام مُعقَّد.

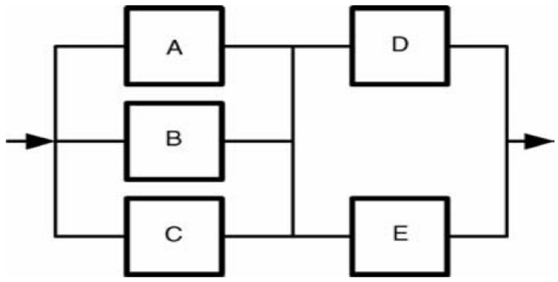
$$R_{\text{نظام}} = (R_{\text{نظام}} \text{ عندما يكون العنصر } X \text{ جيد}) \times R(X)$$
$$+ (R_{\text{نظام}} \text{ عندما يكون العنصر } X \text{ ردئ}) \times Q(X)$$

$$R_{\text{system}} = (R_{\text{system}} \text{ given component } X \text{ is good}) \cdot R(X)$$
$$+ R_{\text{system}} \text{ given component } X \text{ is bad}) \cdot Q(X)$$

يمكن تطبيق هذه النظرية بشكل متكرر بحيث يمكن تقسيم نظام معقد إلى أجزاء قابلة للحل باستخدام الصيغ القياسية. وسيوضح المثال التالي استخدام هذه النظرية باستخدام الشكل 3.8.

مثال 4 -8 :

يتكون نظام رئيسي ، المبين في الشكل 4-20 ، من نظامين فرعيين متصلين على التوالي، أي أن النظام الفرعي 1 يتكون من المكونات A وB وC المتصلة على التوازي والممثلة بـ (A//B//C)، ويتكون النظام الفرعي 2 من المكونات D وE المتصلة على التوازي والممثلة بـ (D//E). جد وثوقية النظام الرئيسي .



الشكل 4-20.

الشكل نظام مكون من خمسة عناصر

$$\begin{aligned} R_{\text{system}} &= R(\text{A}//\text{B}//\text{C}) \times R(\text{D}//\text{E}) \\ &= (1 - Q_A Q_B Q_C)(1 - Q_D Q_E) \\ &= 1 - Q_A Q_B Q_C - Q_D Q_E + Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E \end{aligned}$$

باستخدام نظرية بايز، يتم اختيار أحد المكونات، ولنقل B.

$$\begin{aligned} R_{\text{system}} &= (R_{\text{system}},\ \text{given B is good}) \times R_B + (R_{\text{system}},\ \text{given B is bad}) \times Q_B \\ &= R(\text{D}//\text{E}) \times R_B + R(\text{A}//\text{C}) \times R(\text{D}//\text{E}) Q_B \\ &= (1 - Q_D Q_E)(1 - Q_B) + (1 - Q_A Q_C)(1 - Q_D Q_E) Q_B \\ &= 1 - Q_D Q_E - Q_B + Q_D Q_E Q_B + Q_B - Q_D Q_E Q_B - Q_A Q_C Q_B \\ &\quad + Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E \\ &= 1 - Q_D Q_E - Q_A Q_B Q_C + Q_A Q_B Q_C Q_D Q_E \end{aligned}$$

مثال 4-9 :

يتم توصيل ثنائيين على التوازي كما هو موضح في الشكل4-21 .

قد يتعطل الثنائي بإحدى طريقتين: دائرة قصر (sc) أو دائرة مفتوحة (oc). بافتراض أن:

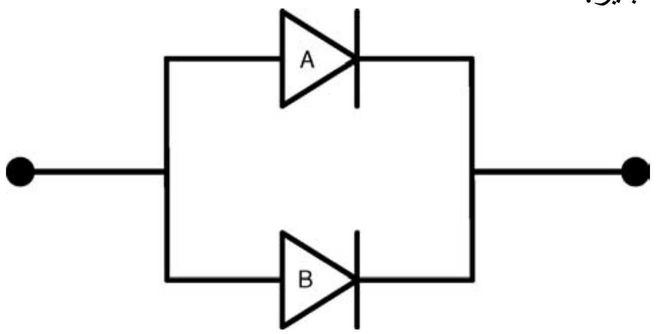
p(o:c:) = 0.1

p(s:c:) = 0.2

ما هو احتمال أن يعمل الثنائيان الموصولان على التوازي؟

الحل:

هذه المسألة مثال توضيحي لاستخدام نظرية بايز.



الشكل 4-21 تكوين نظام لعنصري

ثنائي مرصولين على التوازي.

يمكن كتابة نظرية باي على النحو التالي:

$$R(\text{system}) = R\,(\text{under condition }1) \times P(\text{condition }1) + R\,(\text{under condition }2) \times P(\text{condition }2) + R\,(\text{under condition }3) \times P\,(\text{condition }3) + \cdots$$

في هذه المسألة، توجد ثلاث حالات، وهي: الدائرة المفتوحة، والدائرة القصيرة، والحالة الجيدة.

$$R(\text{system}) = R(\text{diode A o.c.}) \times P(\text{diode A o.c.}) + (\text{diode A s.c.}) \times P(\text{diode A s.c.}) \times R(\text{diode A good}) \times P(\text{diode A good})$$

عندما تكون الدائرة مفتوحة عند الصمام الثنائي A، فإن موثوقية النظام تعتمد على الصمام الثنائي B:

$$R = P(\text{diode B good}) = 0.7$$

عندما يكون الصمام الثنائي A دائرة قصر، يكون النظام معطلاً دائماً:

R= 0

عندما يكون الصمام الثنائي A سليماً، يكون النظام سليماً ما لم يكن الصمام الثنائي B عاطلاً :

$$R = P(\text{diode B good}) + P(\text{diode B o.c.}) = 0.8$$

$$R(\text{system}) = (0.7 \times 0.1) + (0 \times 0.2) + (0.8 \times 0.7) = 0.63$$

12-4 نمذجة نظام الاستعداد: المصطلحات والتعريفات الهامة

• الوحدة Unit : هي مجموعة من المكونات ذات الصلة الوظيفية. (مثل وحدة التوليد، ووحدة التوربينات البخارية).

• المكون Component or Element : هو جهاز يؤدي وظيفة تشغيلية رئيسية. من أمثلته: المحول، ولوحة التوزيع، وقاطع الدائرة، والعازل، والمقاومة، والمحث، والمتسعة أو المكثف، والترانزستور، إلخ.

يمكن تصنيف المكونات إلى مجموعتين:

- مكون غير قابل للإصلاح Non-repairable component
- مكون قابل للإصلاح Repairable component

• حالة الوحدات والمكونات: يمكن أن تكون الوحدة أو المكون في حالتين:

¬ حالة التشغيل (حالة التفعيل) In service

¬ حالة التعطل (عدم الإشتغال أو حالة التوقف) Out of service

• حالات التعطل (أو عدم التشغيل) هي:

(أ) حالات التعطل القسري Forced outage

(1) حالات التعطل القسري المؤقت

(2) انقطاع إجباري دائم

(3) انقطاع إجباري مؤقت

(ب) انقطاع مُجدول: وهو انقطاع مُخطط له لأغراض الاختبار أو الصيانة أو الإنشاء أو الإصلاح.

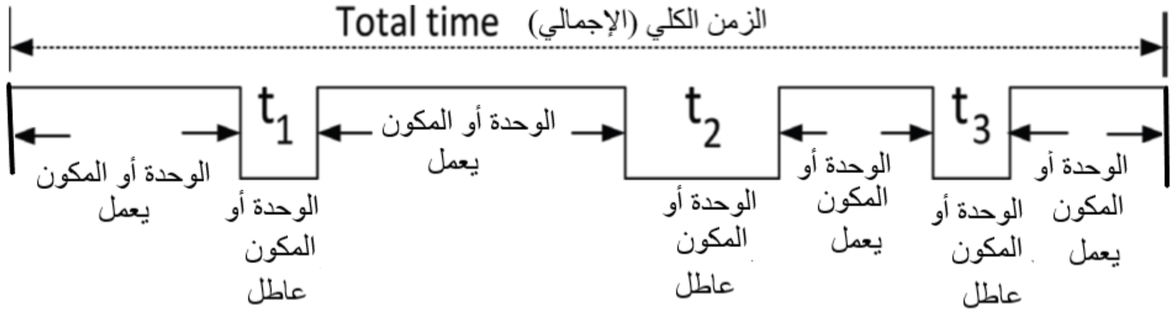
ويعرف معدل الانقطاع القسري (FOR) بكونه = مجموع الوقت الذي تكون فيه الوحدة أو المكون خارج الخدمة/ إجمالي الوقت المعتبر لخدمة الوحدة أو المكون = $t_3+t_2+t_1$ / الوقت الإجمالي

كما يمكن تعريف التوافر على النحو التالي:

التوافر (AV) = الوقت الذي تكون فيه الوحدة أو المكون قيد الخدمة / إجمالي الوقت المخصص لخدمة الوحدة أو المكون

$$AV + FOR = 1.$$

يمكن ملاحظة ذلك في الشكل 4- 22 كما يلي:



الشكل 4-22 توضيح للوحدة أو المكون متوفر (متاح) أو غير متوفر (غير متاح) .

الخلفية

نظام الاستعداد هو ترتيب تكون فيه وحدة واحدة أو أكثر جاهزة لتولي التشغيل عند تعطل وحدة عاملة. يمكن توفير الوحدة الاحتياطية إما لجزء من النظام أو للنظام بأكمله.

تكون وحدة الاستعداد في وضع الخمول قبل تولي التشغيل، وبالتالي لا تتعرض لضغط التشغيل، ويُفترض أن تتمتع بموثوقية 100% أثناء وضع الاستعداد. في الواقع، تتعرض الوحدة لبعض الضغط في وضع الاستعداد. كما أن أجهزة الاستشعار والتحويل الخاصة بتشغيل وحدات الاستعداد ليست موثوقة بنسبة 100%. إذا كانت هذه العوامل مهمة، فيجب أخذها في الاعتبار عند التحليل

1-12-4 قطع غيار لوحدات متعددة قابلة للتبديل

غالبًا ما توجد مجموعة من الوحدات القابلة للتبديل مدعومة بعدد من قطع الغيار القابلة للتبديل. يمكن استخدام قطع الغيار عند حدوث عطل في النظام حتى يتم استهلاك جميع قطع الغيار.

تُعرَّف الوثوقية بأنها احتمال توفر قطعة غيار عند الحاجة إليها خلال الفترة الزمنية المحددة.لتبسيط الأمر، يُفترض أن جميع الوحدات وجميع قطع الغيار لها معدلات فشل متساوية وثابتة. المشكلة مشابهة لتلك الواردة في الفقرة السابقة، حيث لا توجد مشاكل حتى يحدث عطل واحد أكثر من عدد قطع الغيار. لا يُعرَّف هذا على أنه عطل في النظام لأن مجموعة الوحدات لا تُشكِّل بالضرورة "نظامًا" مترابطًا ترابطًا وثيقًا، وفقدان وحدة واحدة لا يُعد بالضرورة عطلًا في "النظام"؛ ولكن الحالتين متماثلتان. وبالتالي، فإن عدم الموثوقية هو احتمال حدوث عطل واحد أكثر من عدد قطع الغيار.

ويكمن الفرق عن مشكلة الوحدة الواحدة، بالطبع، في أن العطل قد يحدث لأي وحدة من وحدات المجموعة، بما في ذلك قطع الغيار. ولا يمكن تمييز الوحدات البديلة عن الوحدات الأصلية، واحتمالية حدوث عدد معين من الأعطال في المجموعة خلال تلك الفترة تتبع توزيع بواسون.

من توزيع بواسون الاحتمالي، تُعطى احتمالات حدوث عدد محدد من الأعطال في الزمن t بالمتسلسلة التالية:

$$1 = P(0) + P(1) + P(2) + \cdots + P(n)$$

$$1 = e^{-\lambda t}\left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \cdots\right)$$

بوجود n من قطع الغيار، يمكن للنظام تحمل n من الأعطال؛ لذلك، فإن موثوقية النظام هي احتمالية حدوث عدد من الأعطال يتراوح بين 0 و n:

$$R(t) = e^{-\lambda t}\left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \cdots + \frac{(\lambda t)^n}{n!}\right)$$

عدم الوثوقية، وهو احتمال نفاد قطع الغيار،

$$Q(t) = 1 - R(t)$$

معدل فشل النظام الاحتياطي هو دالة متغيرة مع الزمن، لكن متوسط الوقت بين حالات الفشل ثابت.

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= \int_0^\infty R(t)\mathrm{d}t \\ &= \int_0^\infty e^{-\lambda t}\left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \cdots + \frac{(\lambda t)^n}{n!}\right)\mathrm{d}t \\ &= \frac{n+1}{\lambda} \end{aligned}$$

بالمقارنة مع نظام متوازٍ مكون من (n+1) مكون، فإن متوسط الوقت بين الأعطال (MTTF) الخاص به هو

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \cdots + \frac{1}{n\lambda} + \frac{1}{(n+1)\lambda}$$

تميز النظام الاحتياطي بفترات زمنية أطول بين الأعطال.

إذا كان معدل فشل الوحدة الواحدة هو l، وكان عدد الوحدات N، فإن العدد المتوقع للأعطال خلال الفترة الزمنية t سيكون Nlt

$$1 = e^{-N\lambda t}\left(1 + N\lambda t + \frac{(N\lambda t)^2}{2!} + \frac{(N\lambda t)^3}{3!} + \cdots\right)$$

كما في اعلاه ، إذا كان هناك n من قطع الغيار، فإن احتمال وجود قطعة غيار عند الحاجة إليها بمرور الوقت t :

$$R = e^{-N\lambda t}\left(1 + N\lambda t + \frac{(N\lambda t)^2}{2!} + \frac{(N\lambda t)^3}{3!} + \cdots + \frac{(N\lambda t)^n}{n!}\right)$$

احتمالية عدم وجود قطعة غيار عند الحاجة هي

$$Q = 1 - R$$

مثال 4-10 :

لدينا ثلاثة محولات احتياطية تدعم 100 محطة أحادية البنك. إذا كان معدل تعطل المحول العامل هو 0.1 سنويًا، فما احتمال عدم توفر أي محولات احتياطية خلال عام؟

الحل:

عندما يكون هناك ثلاث قطع غيار، يمكن للنظام تحمل ثلاثة أعطال. استخدم احتمالية بواسون متسلسلة

$$R = e^{-N\lambda t}\left(1 + N\lambda t + \frac{(N\lambda t)^2}{2!} + \frac{(N\lambda t)^3}{3!}\right)$$

$$N = 100$$
$$\lambda = 0.10$$
$$t = 1$$
$$N\lambda t = 10$$

$$R = e^{-10}\left(1 + 10 + \frac{10^2}{2} + \frac{10^3}{6}\right)$$
$$= 0.01034$$

احتمال عدم وجود قطع غيار

$$= 1 - R$$
$$= 1 - 0.01034$$
$$= 0.98966$$

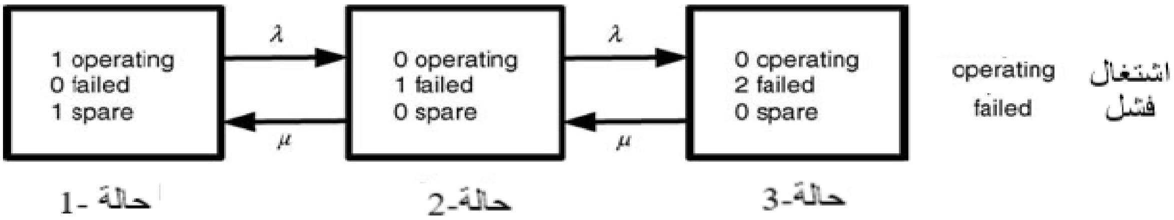
4-12 -2 نموذج ماركوف Markov Model

عندما يكون هناك أكثر من حالتين محتملتين لنظام ما، يصبح التحليل معقدًا. أفضل طريقة لتحليل مثل هذا النظام هي تحليل فضاء الحالة باستخدام عملية ماركوف. تُسمى كل حالة محتملة للنظام حالة. إذا عُرف معدل الدخول إلى والخروج من كل حالة، فيمكن حساب حالة النظام في أي مرحلة.

مثال 4-11:

يتكون نظام من وحدة تشغيل ووحدة احتياطية مماثلة، معدل العطل λ ومعدل الإصلاح μ.

هناك ثلاث حالات ممكنة لهذا النظام كما هو موضح في الشكل4-23.



الشكل 4-23 نموذج لوحدة مزودة بقطع غيار.

يمكن حساب احتمالية التواجد في أي حالة باستخدام نموذج عملية ماركوف. وهي احتمالية تعتمد على الزمن، لكنها تستقر عند قيمة ثابتة. بضرب هذه الاحتمالية في معدل الخروج من تلك الحالة، نحصل على تكرار مواجهة تلك الحالة، ومقلوب معدل الخروج من تلك الحالة يعطي مدة كل مواجهة. في هذا المثال، الحالة 3 هي حالة الفشل. احتمالية التواجد في حالة الفشل عند الاستقرار هي، بحسب التعريف، عدم توافر النظام.

عدم توافر النظام = P(3) كما هو محسوب من نموذج عملية ماركوف

توافر النظام = 1- P(3)

تكرار تعطل النظام = $P(3) \times 2\mu$

متوسط مدة كل تعطل للنظام = $\frac{1}{2\mu}$

يتطلب حساب شروط نظام ديناميكي ذي حالات متعددة استخدام معادلات تفاضلية مصفوفية ويُعدّ الحصول على حل يعتمد على الزمن أمرًا بالغ الصعوبة لجميع الأنظمة باستثناء أبسطها. ومع ذلك، يمكن الحصول على حالات النظام في أي لحظة باستخدام عملية تكرارية تُسمى سلسلة ماركوف، وهي عملية مناسبة تمامًا للتطبيقات الحاسوبية.

إن شروط الحالة المستقرة، على وجه الخصوص، بسيطة للغاية. في الواقع، إذا كانت معدلات الفشل ومعدلات الإصلاح لمختلف المكونات ثابتة، فإن احتمال الحالة المستقرة لأي حالة سيكون ثابتًا أيضًا.

احتمال الحالة المستقرة $P(3)$ في المثال أعلاه هو:

$$P(3) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2\lambda\mu + 2\mu^2}$$

الفصل 5

تقييم وثوقية الأنظمة الكهربائية بطريقتي مخطط شجرة الأعطال وشجرة الأحداث

5-1 مقدمة

يتناول هذا الفصل مجموعة متنوعة من أساليب تقييم وثوقية الأنظمة المعقدة أو تكوينات الشبكات.من هذه الأساليب تحليل شجرة الأعطال و تحليل شجرة الأحداث و تطبيق نظرية الاحتمال الشرطي على تكوينات تشغيل النظام وتوضيح العلاقات وأوجه التشابه بين مختلف التقنيات. واستخدام هذه الأساليب في مواقف واقعية بشكل أو بآخر لأسباب وأغراض متنوعة. على سبيل المثال، يُستخدم تحليل شجرة الأعطال على نطاق واسع في تقييمات السلامة والوثوقية لمحطات الطاقة النووية. بالنسبة للمحلل، تتمثَّل المهمة الأولى في تقييم المشكلة المطروحة وتحديد الأسلوب الذي من شأنه أن يُحقق تقييم الوثوقية المطلوب عند تطبيقه.

5-2 تحليل شجرة الأعطال

يستخدم تحليل شجرة الأعطال هياكل شجرية لتوفير طريقة منهجية لعرض التسلسلات المنطقية التي قد تؤدي إلى فشل النظام المعقد. تُستخدم البوابات المنطقية الموضحة في الجدول التالي لنمذجة تفاعلات ا إن طريقة تحليل مخطط شجرة الأعطال طريقة أخرى لتقييم وثوقية الأنظمة . في هذه الطريقة يستخدم المنطق في تحديد العطلات في المعدات والأنظمة . و يجب أولاً تحديد جميع أحداث الأعطال الرئيسية المرتبطة بمكونات و/ أو الأنظمة الفرعية للنظام أو جزء منه المراد تحليله. ثم، يتم ربط أحداث الأعطال المختلفة باستخدام بوابات المنطق OR أو AND المناسبة. وسيتم في هذه الفقرة توضيح الطريقة من خلال عدة أمثلة.

يقوم تحليل شجرة الأعطال بتحديد وترتيب مجموعات الأحداث الممثلة في شجرة الأعطال التي تسبب فشل النظام، ويقدم تقديرات لاحتمالية فشل النظام.

5-3 منهجية التحليل النوعي لشجرة الأعطال

يحدد التحليل النوعي لشجرة الأعطال ما يلي: أ) احتمال فشل النظام (الحدث الأعلى) بناءً على سبب فشل واحد (الحدث الأساسي) أو احتمال السبب المشترك باستخدام مجموعات القطع الصغرى، ب) مجموعة

يحدد التحليل النوعي لشجرة الأعطال ما يلي: أ) احتمال فشل النظام (الحدث الأعلى) بناءً على سبب فشل واحد (الحدث الأساسي) أو احتمال السبب المشترك باستخدام مجموعات القطع الصغرى، ب) مجموعة من حالات فشل المكونات (مجموعات القطع الصغرى)، ج) ترتيب أهمية المساهمين في فشل النظام.

تُستخدم رموز الأحداث الأساسية عادةً كما يلي:

• الحدث الأساسي **Basic event**: عطل أو خطأ في أحد مكونات النظام أو عناصره (مثال: مفتاح عالق في وضع الفتح).

• الحدث الوسيط **Intermediate event** : حدث ناتج عن اجتماع حدثين أساسيين أو أكثر.

• الحدث غير المُطوَّر **Undeveloped event**: حدث لا تتوفر عنه معلومات كافية، أو ليس له أي تأثير.

• الحدث المُهيئ **Conditioning event**: شروط تُقيِّد أو تؤثر على البوابات المنطقية (مثال: وضع التشغيل المُفعَّل).

تعمل البوابات كما يلي:

• بوابة OR: يُخرج النظام إشارة إذا حدث أي إدخال.

• بوابة AND: يُخرج النظام إشارة فقط إذا حدثت جميع المدخلات (المدخلات مستقلة).

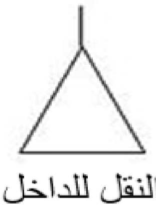
• بوابة XOR: يُخرج النظام إشارة إذا حدث إدخال واحد فقط.

• بوابة AND ذات الأولوية: يُخرج النظام إشارة إذا حدثت المدخلات بتسلسل محدد بواسطة حدث شرطي.

• بوابة المنع: يُخرج النظام إشارة إذا حدث الإدخال في ظل شرط تمكين محدد بواسطة حدث شرطي.

رموز الإنتقال :

تُستخدم رموز النقل أو الإنتقال لربط مدخلات ومخرجات أشجار الأعطال ذات الصلة، مثل شجرة أعطال النظام الفرعي بنظامه.

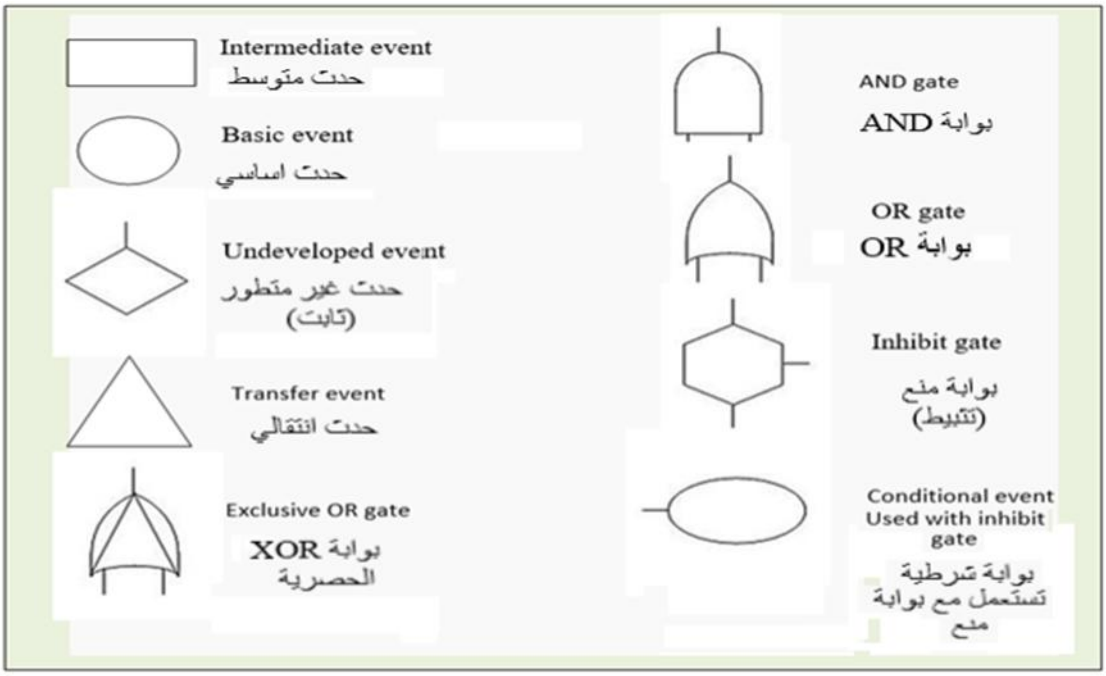


النقل للداخل

النقل للخارج

ويبين الجدول 5-1 الرموز المستخدمة في تحليل شبكة الأعطال.

الجدول 5 -1: رموز بوابات وأحداث شجرة الأعطال



5-3-1 خصائص شجرة الأعطال

1. تحليل "من أعلى إلى أسفل"، حيث يتم تحديد الحدث الرئيسي أولاً.

2. لا يشمل بالضرورة جميع أنماط الأعطال المحتملة لمكونات النظام، بل يقتصر على أنماط الأعطال التي تُسهم في حدوث الحدث الرئيسي.

3. شجرة الأعطال هي تعبير عن المنطق البولياني، أي أن جميع الأحداث الأساسية ثنائية، أي إما صحيحة أو خاطئة.

ترتبط الأحداث في شجرة الأعطال باحتمالات إحصائية أو بمعدلات ثابتة موزعة وفقًا لتوزيع بواسون-الأُسّي. على سبيل المثال، قد تحدث أعطال المكونات عادةً بمعدل فشل ثابت λ (دالة خطر ثابتة). في هذه الحالة الأبسط، يعتمد احتمال الفشل على المعدل λ وزمن التعرض t.

$$P = 1 - e^{-\lambda t}$$

حيث

إذا كانت $\lambda t < 0.001$ $\quad P \approx \lambda t$

غالبًا ما تُقاس شجرة الأعطال بفترة زمنية محددة، مثل ساعة طيران أو متوسط مدة مهمة. وتعتمد احتمالات وقوع الأحداث على علاقة دالة مخاطر الحدث بهذه الفترة.

على عكس مخططات البوابات المنطقية التقليدية التي تحمل فيها المدخلات والمخرجات القيم الثنائية صواب (1) أو خطأ (0)، فإن احتمالات مخرجات البوابات في شجرة الأعطال مرتبطة بعمليات المجموعات في المنطق البولياني. ويعتمد احتمال وقوع حدث مخرج البوابة على احتمالات وقوع حدث المدخل.

تمثل بوابة "AND" مجموعة من الأحداث المستقلة. أي أن احتمال أي حدث مُدخل إلى بوابة "AND" لا يتأثر بأي حدث مُدخل آخر إلى نفس البوابة. من الناحية النظرية، يُعادل هذا تقاطع مجموعات أحداث الإدخال، ويُعطى احتمال مُخرج بوابة "AND" بالصيغة التالية:

$$P\,(A \text{ and } B) = P\,(A \cap B) = P(A)\,P(B)$$

أما بوابة OR، من ناحية أخرى، فتتوافق مع اتحاد المجموعات:

$$P\,(A \text{ or } B) = P\,(A \cup B) = P(A) + P(B) - P\,(A \cap B)$$

بما أن احتمالات الفشل على أشجار الأعطال تميل إلى أن تكون صغيرة (أقل من 0.01)، فإن $P\,(A \cap B)$ عادة ما يصبح حد خطأ صغيرًا جدًا، ويمكن تقريب خرج بوابة OR بشكل متحفظ باستخدام افتراض أن المدخلات أحداث حصرية متبادلة :mutually exclusive events:

$$P\,(A \text{ or } B) \approx P(A) + P(B),\ P\,(A \cap B) \approx 0$$

تمثل بوابة " OR الحصرية" exclusive OR ذات المدخلين احتمال حدوث أحد المدخلين أو الآخر، وليس كليهما:

$$P\,(A \text{ xor } B) = P(A) + P(B) - 2P\,(A \cap B)$$

مرة أخرى، بما أن $P\,(A \cap B)$ عادة ما يصبح حد خطأ صغيرًا جدًا، فإن بوابة XOR لها قيمة محدودة في شجرة الأعطال.

في كثير من الأحيان، تُستخدم معدلات التوزيع بواسون- الأسي لتحديد كمية شجرة الأعطال بدلاً من الاحتمالات. غالبًا ما تُنمذج المعدلات على أنها ثابتة مع الزمن، بينما الاحتمال دالة للزمن. تُنمذج أحداث التوزيع بواسون – الأسي على أنها قصيرة جدًا بحيث لا يمكن لحدثين أن يتداخلا. بوابة OR هي عبارة عن تراكب (جمع المعدلات) لترددي الفشل المدخلين أو معدلات الفشل، واللذين يُنمذجان كعمليات بواسون

نقطية. يُحسب خرج بوابة AND باستخدام عدم توفر (Q_1) أحد الأحداث، مما يُخفف عملية بواسون النقطية للحدث الآخر ($\lambda 2$). ثم يُخفف عدم توفر (Q_2) الحدث الآخر عملية بواسون النقطية للحدث الأول ($\lambda 1$). تُركّب عمليتا بواسون النقطيتان الناتجتان وفقًا للمعادلات التالية.

إن ناتج بوابة AND هو مزيج من حدثي الإدخال المستقلين 1 و 2 إلى بوابة AND:

معدل الفشل = $\lambda_1 Q_2 + \lambda 2 Q_1$ حيث $Q = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t$ إذا كان $0.001 > \lambda t$

معدل الفشل $\approx \lambda_1\lambda_2 t_2 + \lambda_2\lambda_1 t_1$ إذا كان $0.001 > \lambda_1 t_1$ و $0.001 > \lambda_2 t_2$

في شجرة الأعطال، قد يُعرَّف عدم التوافر (Q) بأنه عدم إمكانية التشغيل الآمن، وقد لا يشير إلى عدم إمكانية تشغيل النظام، وذلك بحسب بنية شجرة الأعطال. يجب تحديد مُدخلات شجرة الأعطال بدقة.

التحليل

يمكن استخدام العديد من المناهج المختلفة لنمذجة شجرة الأعطال، ولكن الطريقة الأكثر شيوعًا وانتشارًا يمكن تلخيصها في بضع خطوات. تُستخدم شجرة أعطال واحدة لتحليل حدث واحد غير مرغوب فيه، والذي يمكن إدخاله لاحقًا في شجرة أعطال أخرى كحدث أساسي. على الرغم من أن طبيعة الحدث غير المرغوب فيه قد تختلف اختلافًا كبيرًا، إلا أن شجرة الأعطال تتبع الإجراء نفسه لأي حدث غير مرغوب فيه؛ سواء كان تأخيرًا قدره 0.25 مللي ثانية في توليد الطاقة الكهربائية، أو حريقًا غير مكتشف في عنبر الشحن، أو إطلاقًا عشوائيًا غير مقصود لصاروخ باليستي عابر للقارات.

يتضمن تحليل شجرة الأعطال خمس خطوات:

1. تحديد الحدث غير المرغوب فيه المراد دراسته.

قد يكون تحديد الحدث غير المرغوب فيه صعبًا للغاية، على الرغم من سهولة ووضوح ملاحظة بعض الأحداث. يُعدّ المهندس ذو المعرفة الواسعة بتصميم النظام الشخص الأنسب للمساعدة في تحديد الأحداث غير المرغوب فيها وترقيمها. تُستخدم الأحداث غير المرغوب فيها بعد ذلك لإنشاء شجرة الأعطال. يقتصر كل تحليل شجرة أعطال على حدث غير مرغوب فيه واحد.

2. فهم النظام.

بمجرد تحديد الحدث غير المرغوب فيه، تُدرس وتُحلل جميع الأسباب التي تزيد احتمالية تأثيرها على هذا الحدث عن صفر. عادةً ما يكون الحصول على أرقام دقيقة لاحتمالات حدوث الحدث أمرًا مستحيلاً نظرًا

لتكلفته العالية واستهلاكه للوقت. لذا، يُستخدم برنامج حاسوبي لدراسة الاحتمالات، مما قد يُسهم في تقليل تكلفة تحليل النظام.

يُمكن لمحللي النظم المساعدة في فهم النظام ككل. يمتلك مصممو النظم معرفة شاملة بالنظام، وهذه المعرفة بالغة الأهمية لضمان عدم إغفال أي سبب يؤثر على الحدث غير المرغوب فيه. بالنسبة للحدث المُحدد، تُرقم جميع الأسباب وتُرتب حسب تسلسل حدوثها، ثم تُستخدم في الخطوة التالية وهي رسم أو إنشاء شجرة الأعطال.

3. أنشئ شجرة الأعطال.

بعد تحديد الحدث غير المرغوب فيه وتحليل النظام لمعرفة جميع الآثار المُسببة له (واحتمالاتها إن أمكن)، يُمكننا الآن إنشاء شجرة الأعطال. تعتمد شجرة الأعطال على بوابات "AND" و"OR" التي تُحدد خصائصها الرئيسية.

4. تقييم شجرة الأعطال.

بعد تجميع شجرة الأعطال لحدث غير مرغوب فيه محدد، يتم تقييمها وتحليلها لتحديد أي تحسينات ممكنة، أو بعبارة أخرى، دراسة إدارة المخاطر وإيجاد سبل لتحسين النظام. يمكن تطبيق مجموعة واسعة من أساليب التحليل النوعية والكمية. تُعد هذه الخطوة بمثابة مقدمة للخطوة النهائية، وهي التحكم في المخاطر المحددة. باختصار، في هذه الخطوة، نحدد جميع المخاطر المحتملة التي تؤثر على النظام بشكل مباشر أو غير مباشر.

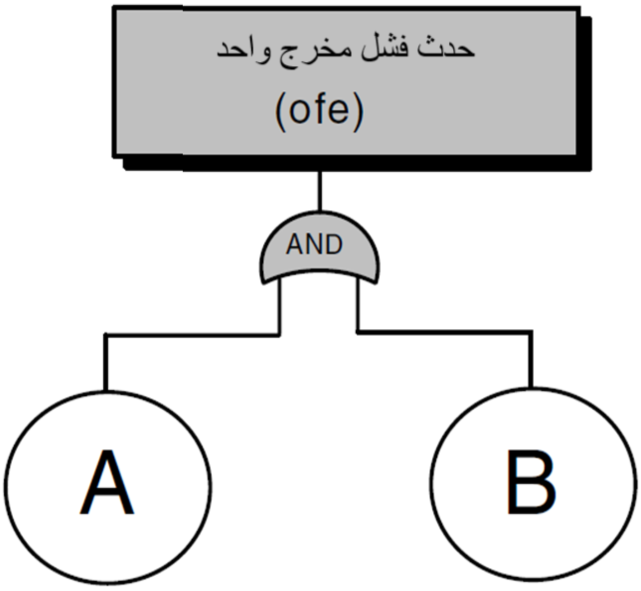
5. التحكم في المخاطر المحددة.

تختلف هذه الخطوة اختلافًا كبيرًا من نظام لآخر، ولكن النقطة الأساسية دائمًا هي أنه بعد تحديد المخاطر، يتم اتباع جميع الأساليب الممكنة لتقليل احتمالية حدوثها.

2-3-5 القواعد الأساسية لدمج احتمالية أحداث فشل المدخلات Inputs المستقلة لتقييم احتمالية حدث فشل مخرج واحد Single output failure

- بوابة AND : لفترض أن الحدثين A وB هما حدثا فشل مستقلان. ستؤدي التوليفات المنطقية المختلفة لفشل هذين الحدثين إلى حدوث حدث فشل مخرج واحد (OFE) output failure event . فإذا كانت احتمالات أحداث فشل المدخلات A وB معروفة، فإنه يمكن تقييم احتمالية حدث فشل المخرج بناءً على العلاقة المنطقية بين أحداث فشل المدخلات وحدث فشل المخرج الناتج.

يوضح الشكل 5-3 مخطط شجرة الأعطال لدائرة OFE عامة مع حدثي فشل في المدخلات متصلين بواسطة بوابة AND.



الشكل 5 -3 مخطط شجرة الأعطال: بوابة AND.

إذا كانت P(A) تساوي احتمال وقوع حدث الفشل A، وP(B) تساوي احتمال وقوع حدث الفشل B، فإن

$$P(OFE) = P(A \cap B) = P(A) \cap P(B)$$

بشكل عام، إذا تسببت مجموعة من أحداث الفشل المدخلة A_1 إلى A_n المتصلة ببوابة AND في وقوع حدث الفشل (OFE)، فإن احتمال وقوع حدث الفشل الناتج هو:

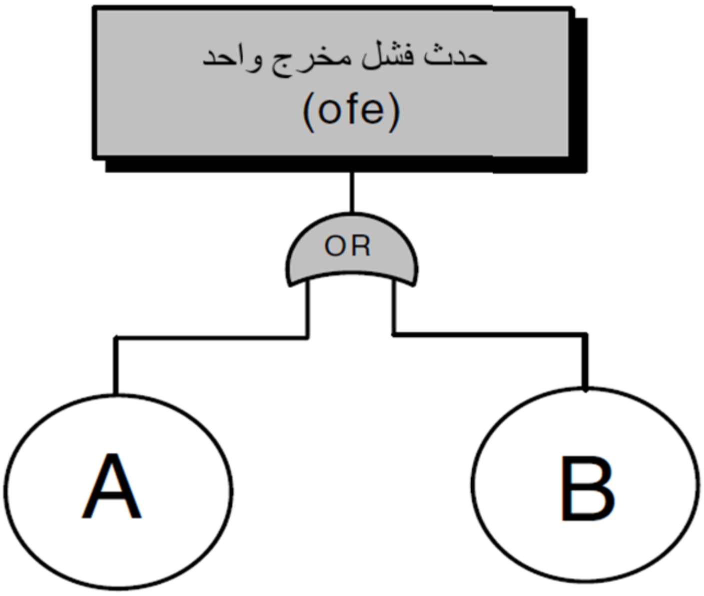
$$P(\mathrm{OFE}) = P(\mathrm{A}_1 \cap \mathrm{A}_2 \cap \mathrm{A}_3 \cdots \cap \mathrm{A}_n) = P(\mathrm{A}_1)P(\mathrm{A}_2)P(\mathrm{A}_3)\cdots P(\mathrm{A}_n)$$

بشكل عام، بالنسبة للوصلات المنطقية لبوابة AND، فإن احتمال فشل المخرج هو حاصل ضرب احتمالات فشل المدخل.

- بوابة OR. يوضح الشكل 6-4 مخطط شجرة الأعطال لحدث فشل عام في المخرجات مع حدثي فشل في المدخلات متصلين بواسطة بوابة OR.

إذا كانت P(A) تساوي احتمال وقوع حدث الفشل A، وP(B) تساوي احتمال وقوع حدث الفشل B، فإن

$$P(\mathrm{OFE}) = P(\mathrm{A} \cup \mathrm{B}) = P(\mathrm{A}) + P(\mathrm{B}) - P(\mathrm{A})P(\mathrm{B})$$



الشكل 5-4 مخطط شجرة الأعطال: بوابة OR

اعتمادًا على حجم احتمالية حدوث أعطال في مدخلات بوابة OR، يمكن تبسيط معادلة P(OFE)، خاصةً عند وجود ثلاثة أعطال أو أكثر. إذا كانت احتمالات P(A) وP(B) أقل من 0.1، فإن حاصل ضرب P(A) وP(B) يكون صغيرًا جدًا ويمكن إهماله. وتصبح الصيغة التقريبية الناتجة لـ P(OFE)

$$P(\text{OFE}) = P(\text{A} \cup \text{B}) = P(\text{A}) + P(\text{B})$$

ملاحظة: قبل تطبيق المعادلة المبسطة الموضحة أدناه، من الضروري أن تكون احتمالات أحداث فشل المدخلات أقل من 0.10.

بشكل عام، إذا تسببت مجموعة من أحداث فشل المدخلات A_1 إلى A_n المتصلة ببوابة OR في حدوث حدث الفشل (OFE)، فإن احتمال حدث فشل المخرجات هو

$$P(\text{OFE}) = P(\text{A}_1 \cup \text{A}_2 \cup \text{A}_3 \cdots \cup \text{A}_n) = P(\text{A}_1) + P(\text{A}_2) + P(\text{A}_3) \cdots + P(\text{A}_n)$$

بشكل عام، بالنسبة للوصلات المنطقية لبوابة OR، فإن احتمال فشل المخرج هو مجموع احتمالات فشل المدخل.

مثال 5-1 :

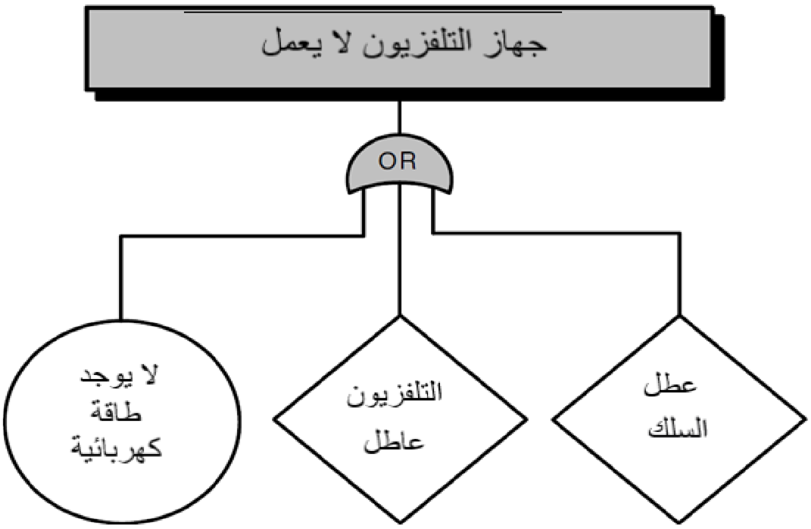
لو فرضنا أن هناك شاشة تلفزيون لا تعمل . من المعروف أن هذا العطل الكبير قد يكون نتيجةً لمجموعة من الأعطال الفردية التالية (أي الأعطال الثانوية):

1. انقطاع التيار الكهربائي

2. عطل في سلك خدمة التلفزيون

3. عطل في جهاز التلفزيون نفسه .

إن معيار تعطل النظام (أي التلفزيون) هو أنه في حال حدوث أي من الأعطال الثانوية، فلن يعمل التلفزيون (أي شرط المنطق هو بوابة OR). ويمكن استخدام مخطط شجرة الأعطال التالي لتمثيل عملية تعطل شاشة التلفزيون (الشكل5-5).



الشكل 5-5 مخطط شجرة الأعطال: شاشة تلفزيون لا تعمل.

مثال 5-2 :

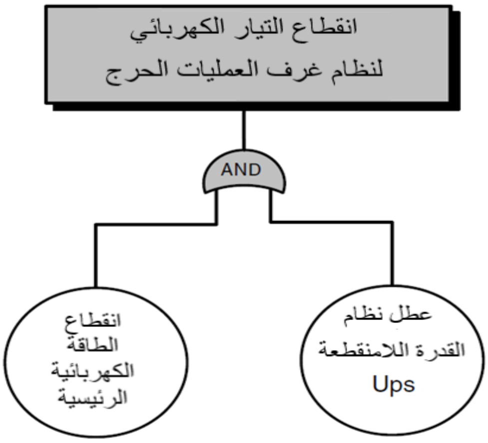
يؤدي انقطاع التيار الكهربائي عن نظام غرف العمليات في مستشفى معين إلى تعطل النظام. ويعتمد هذا العطل الرئيسي على أحداث العطل الفردية التالية:

1. انقطاع التيار الكهربائي عن الشبكة الرئيسية

2. تعطل نظام القدرة غير المنقطعة (UPS).

إن معيار تعطل النظام (أي نظام غرف العمليات) هو أنه إذا حدثت جميع أحداث العطل الثانوية، فسيتعطل نظام نظام غرف العمليات الحرج (أي ينطبق عليه شرط بوابة AND).

يمكن استخدام مخطط شجرة الأعطال التالي لتمثيل عملية تعطل نظام نظام غرف العمليات الحرج (الشكل5-6).

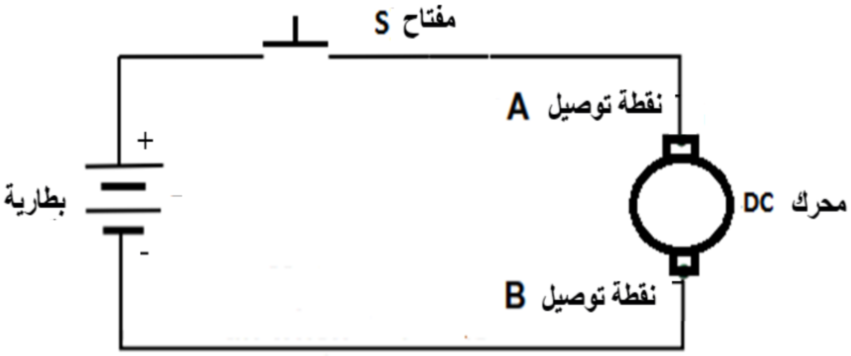


الشكل 5- 6 مخطط شجرة الأعطال

لنظام غرف العمليات الحرج.

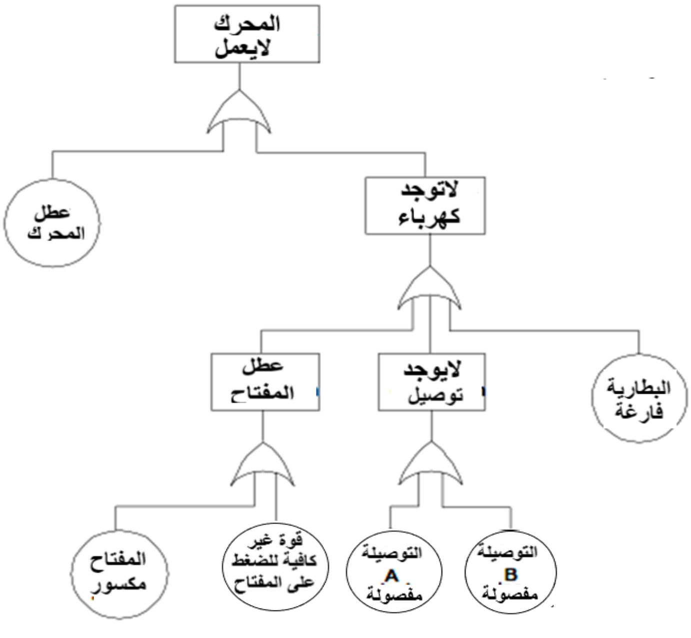
مثال 5-3:

ارسم تحليل شجرة الأعطال للدائرة الموضحة في الشكل 5-7، إذا كان محرك التيار المستمر لا يعمل عند الضغط على المفتاح (S).



الشكل 5-7 .

الحل: يظهر مخطط شجرة الأعطال في الشكل 5-8 التالي:



الشكل 5-8.

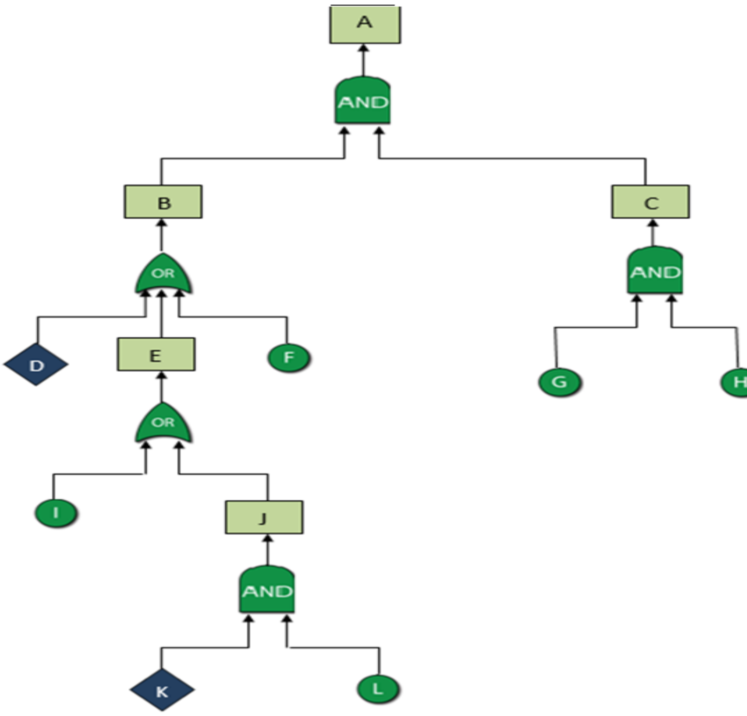
مثال 5-4:

حدد احتمال وقوع الحدث A في شجرة الأعطال الموضحة في الشكل 5-9 أدناه، إذا كانت جميع الأحداث الأساسية مستقلة إحصائيًا ومتنافية فيما بينها. تُقدَّر احتمالات الحدث الأساسي كما يلي:

$P(D)= 0.05$ $P(H) = 0.12$ $P(L) = 0.05$

$P(F) = 0.15$ $P(I) = 0.10$

$P(G) = 0.20$ $P(K) = 0.05$



الشكل 5-9.

الحل :

$$P(J) = P(K) \cap P(L) = P(K).\ P(L) = (0.05)\ (0.02) = 0.0025$$

$$P(E) = P(I) \cup P(J) = P(I) + P(J) = 0.10+0.0025 = 0.1025$$

$$P(B)= P(D) \cup P(E) \cup P(F) = P(D) + P(E)+ P(F)= 0.05 + 0.1025 +0.15 = 0.3025$$

$$P(C) = P(G) \cap P(H) = P(G).\ P(H) = (0.20)\ (0.12) = 0.0240$$

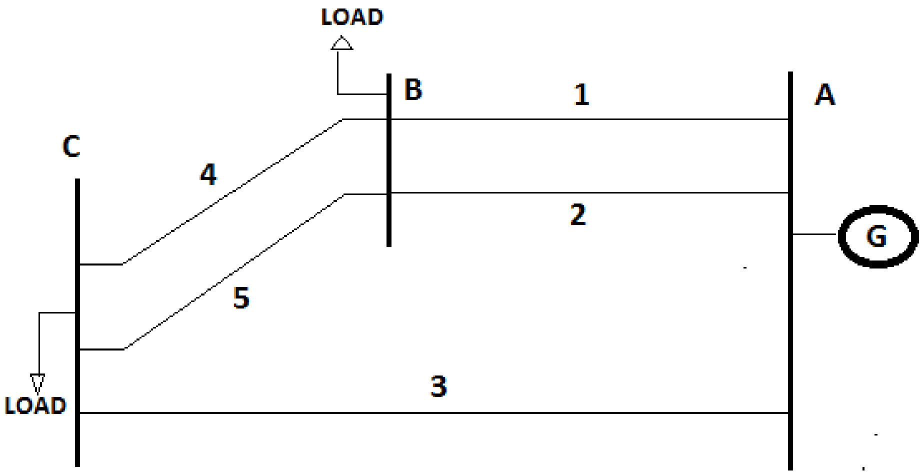
$$P(A)= P(B) \cap P(C) = P(B).\ P(C) = (0.3025)\ (0.0240)$$

مثال5-5 :

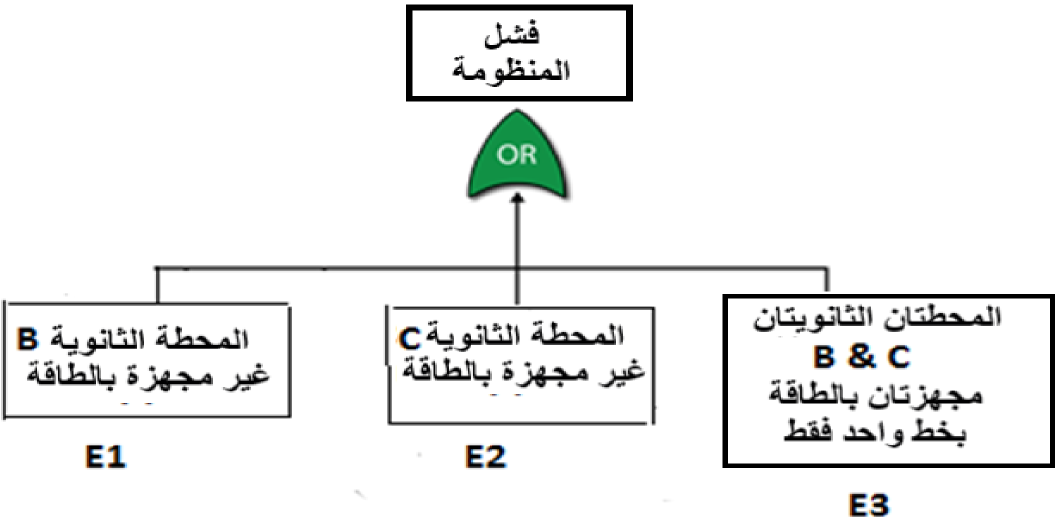
لنفترض نظام الطاقة الموضح في الشكل 5-10. يمثل المولد في المحطة A تدفق الطاقة الذي يمكن اعتباره موثوقًا تمامًا لأغراض هذا المثال. عرّف "عطل النظام" على النحو التالي:

- المحطة B معزولة أو
- المحطة C معازولة أو
- يتم نقل الحمل المشترك للمحطتين B وC بواسطة دائرة واحدة.

ارسم مخطط شجرة الأعطال لهذا النظام.



الشكل 5-10.



الحل: الحدث الرئيسي هو "عطل في النظام". بناءً على التعريف المعطى، يمكننا رسم المستوى الأول من الشجرة على النحو التالي:

المستوى الأول

الآن، نحلل كلًا من الطرق الثلاث التي قد يفشل بها النظام:

1. لكي يحدث الحدث E1، يتطلب الأمر ثلاثة أحداث:

أ. انقطاع الدائرة 1 (حدث أساسي)

ب. انقطاع الدائرة 2 (حدث أساسي)

ج. انقطاع التيار الكهربائي من المحطة C (حدث وسيط)

لأن نمط الفشل هذا يتطلب حدوث جميع هذه الأحداث، فإننا نمررها عبر بوابة AND.

2. يتطلب وقوع الحدث E2 وقوع حدثين:

أ. انقطاع الدائرة 3 (الحدث الأساسي)

ب. انقطاع التيار الكهربائي من المحطة الفرعية B (الحدث الوسيط)

ولأن هذا النمط من الأعطال يتطلب وقوع هذين الحدثين معًا، فإننا نمررهما عبر بوابة AND.

3. حدوث الحدث E3 بثلاث طرق مختلفة:

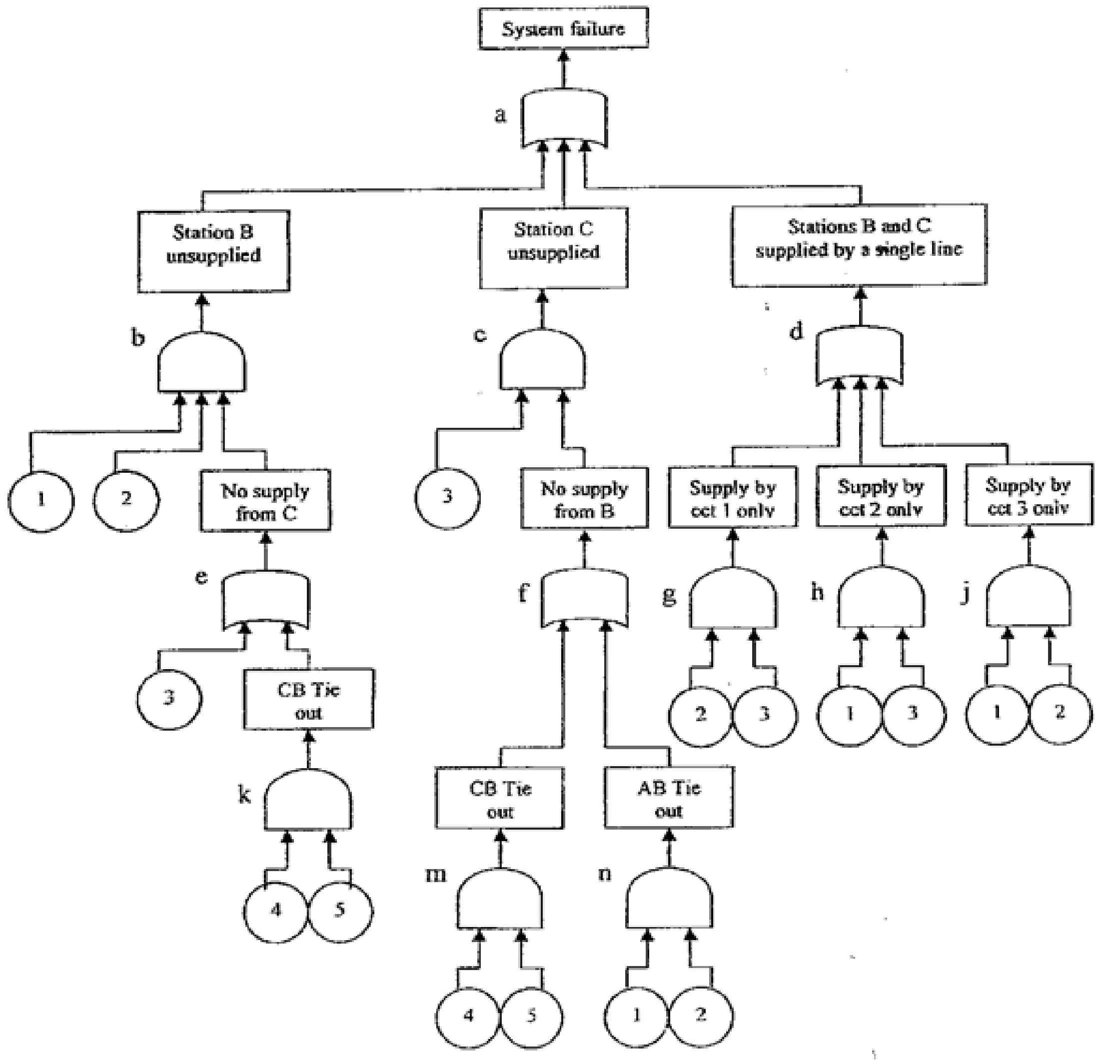
أ. التغذية من الدائرة 1 فقط (حدث وسيط)

ب. التغذية من الدائرة 2 فقط (حدث وسيط)

ج. التغذية من الدائرة 3 فقط (حدث وسيط)

بما أن هذا النمط من الأعطال يحدث عند حدوث أي من هذه الأحداث الثلاثة، فإننا نمررها عبر بوابة OR.

بهذه الطريقة، يمكننا رسم المستوى الثاني، ثم المستوى الثالث، وأخيرًا ستكون الشجرة الكاملة كما هو موضح في الشكل 5-11.



الشكل5-11: شجرة الأعطال للمثال 5-5.

مثال 5-6:

السيارة ذات الحالة الميكانيكية الممتازة لا تعمل في الطقس البارد .

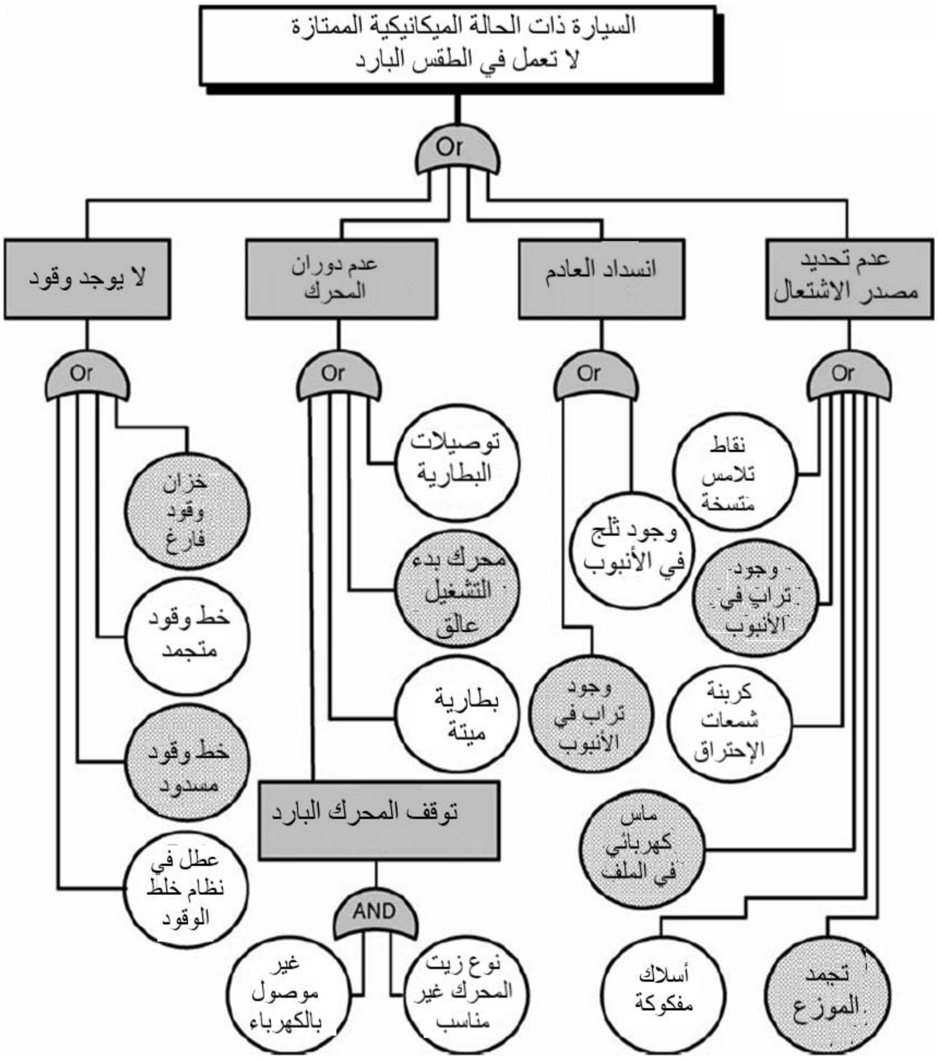
هناك خمسة أعطال رئيسية تؤثر على ذلك، وهي:

1. نفاد الوقود،
2. عدم دوران المحرك،
3. انسداد العادم،
4. عدم تحديد مصدر الاشتعال،
5. برودة كتلة المحرك.

إذا حدث أي من الأحداث الرئيسية الأربعة الأولى، فلن يعمل محرك السيارة في الطقس البارد.

يُوضح الشكل 5-25 أحد مخططات شجرة الأعطال المحتملة التي تُساهم في فشل تشغيل المحرك في الطقس البارد. أما أحداث الأعطال الثانوية، واحتمالاتها، فهي مُحددة في الأسطر التالية الخاصة بمخطط شجرة الأعطال .

1. عطل رئيسي: نفاد الوقود ، احتمالية حدوث أعطال ثانوية
   - خزان وقود فارغ 0.05
   - خط وقود متجمد 0.02
   - خط وقود مسدود 0.01
   - خط وقود مسدود 0.01
   - عطل في نظام خلط الوقود 0.01
2. عطل جسيم: لا يدور المحرك ، احتمالية حدوث أعطال طفيفة
   - وصلات البطارية 0.03
   - بطارية فارغة 0.05
   - محرك التشغيل عالق 0.005
3. حدث رئيسي: توقف المحرك البارد، احتمالية حدوث أعطال طفيفة
   - غير موصول بالكهرباء 0.10
   - نوع زيت المحرك غير مناسب 0.10
4. حدث رئيسي: انسداد العادم ، احتمالية حدوث أعطال طفيفة
   - وجود تراب في الأنبوب 0.001
   - وجود ثلج في الأنبوب 0.001
5. عطل رئيسي: عدم وجود اشتعال ، احتمالية حدوث أعطال ثانوية
   - نقاط تلامس متسخة 0.03
   - أسلاك رطبة 0.03
   - أسلاك مفكوكة 0.01
   - تجمد الموزع 0.01
   - كربنة شمعات الإحتراق 0.01
   - ماس كهربائي في الملف 0.01



الشكل5-12 مخطط شجرة الأعطال: محرك السيارة لا يعمل في الطقس البارد.

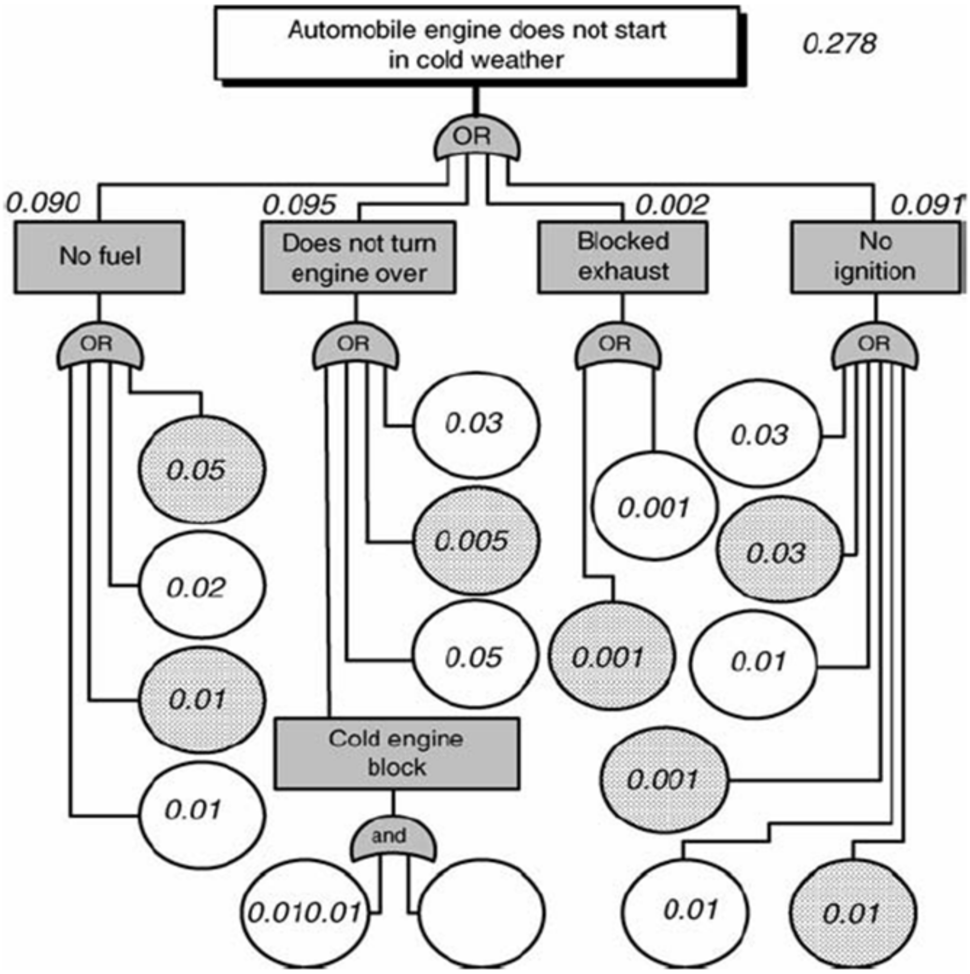
يمكن استنتاج إجراء تقييم احتمال عدم تشغيل محرك السيارة في الطقس البارد من مخطط شجرة الأعطال المذكور أعلاه كما يلي:

الخطوة 1: بدءًا من أسفل مخطط الشجرة وصولًا إلى أعلاه، قم بتقييم احتمالية كل حدث فشل رئيسي من خلال ملاحظة احتمالات أحداث الفشل الثانوية المدخلة والارتباط المنطقي بين حدث الفشل الرئيسي المطلوب وأحداث الفشل الثانوية المدخلة، ثم اجمع احتمالات أحداث الفشل الثانوية المدخلة لوصلات بوابة OR لتقييم احتمالية حدث الفشل الرئيسي.

في هذه الحالة، P(انسداد العادم) = P(تراب في الأنبوب) + P(الثلج في الأنبوب)

= 0:001 + 0:001 = 0:002

تُظهر مخططات شجرة الأعطال في الشكل 5-13 الاحتمالات المُحددة للأحداث الثانوية.



الشكل5-13. مخطط شجرة الأعطال: عدم تشغيل محرك السيارة في الطقس البارد - الاحتمالات المحددة.

اضرب احتمالات أحداث الأعطال الثانوية المدخلة لوصلات بوابة AND لتقييم احتمالية حدث العطل الرئيسي.

على سبيل المثال، P (محرك بارد) = P (غير موصول) P (زيت محرك غير مناسب) = 0.1(0.1) = 0.01.

الخطوة 2: تقييم احتمالية كل حدث فشل رئيسي في المخرجات من احتمالات فشل المدخلات الرئيسية والثانوية المحسوبة سابقًا.

على سبيل المثال:

احتمالية عدم تشغيل المحرك = احتمالية وجود مشكلة في توصيلات البطارية + احتمالية نفاد شحن البطارية + احتمالية تعطل بادئ التشغيل + احتمالية توقف المحرك بسبب البرد + احتمالية توقف المحرك بسبب البرد

= 0.03 + 0.05 + 0.005 + 0.01 = 0.095

الخطوة 3: تقييم احتمالية حدوث عطل رئيسي واحد من احتمالات الأعطال الرئيسية المحسوبة سابقًا

مع ملاحظة العلاقة المنطقية بين أحداث الإدخال هذه وحدث العطل الرئيسي

احتمالية عدم تشغيل محرك السيارة في الطقس البارد = احتمالية عدم وجود وقود + احتمالية عدم دوران المحرك + احتمالية انسداد العادم + احتمالية عدم وجود اشتعال

= 0.091 + 0.002 + 0.095 + 0.090

= 0.278

4-5 تحليل شجرة الأحداث لتقييم وثوقية الأنظمة الكهربائية

تحليل شجرة الأحداث (ETA) Event tree analysis هو أسلوب نمذجة منطقية من أعلى إلى أسفل، يعتمد على كل من حالتي النجاح والفشل للمكون أو العنصر أو النظام ، ويستكشف الاستجابات من خلال حدث بدء واحد، ويضع مسارًا لتقييم احتمالات النتائج وتحليل النظام بشكل عام. يتم استخدام أسلوب التحليل هذا لتحليل آثار الأنظمة العاملة أو الفاشلة بالنظر إلى وقوع حدث ما.

تُعدّ تقنية تحليل الأحداث (ETA) أداةً فعّالة لتحديد جميع عواقب النظام التي يُحتمل حدوثها بعد حدثٍ مُسبّب، ويمكن تطبيقها على نطاقٍ واسع من الأنظمة، بما في ذلك محطات الطاقة النووية، والمركبات الفضائية، والمصانع الكيميائية. يُمكن تطبيق هذه التقنية على النظام في المراحل الأولى من عملية التصميم لتحديد المشكلات المُحتملة، بدلاً من معالجتها بعد وقوعها. وبفضل هذه العملية المنطقية الاستباقية، يُمكن أن يُساعد استخدام تقنية تحليل الأحداث (ETA) كأداةٍ في تقييم المخاطر على منع حدوث النتائج السلبية،

وذلك بتزويد مُقيّم المخاطر باحتمالية وقوعها. تستخدم تقنية تحليل الأحداث (ETA) نوعًا من تقنيات النمذجة يُسمى "شجرة الأحداث"، حيث تتفرع الأحداث من حدثٍ واحد باستخدام المنطق البولياني.

لقد ظهر مصطلح "شجرة الأحداث" لأول مرة خلال دراسة السلامة لمحطة الطاقة النووية WASH-1400 (حوالي عام 1974)، حيث احتاج فريق WASH-1400 إلى طريقة بديلة لتحليل شجرة الأعطال نظرًا لكبر حجمها. وعلى الرغم من عدم استخدام مصطلح "شجرة الأحداث" في ذلك الوقت، فقد أدخلت هيئة الطاقة الذرية البريطانية (UKAEA) تحليل شجرة الأحداث (ETA) لأول مرة في مكاتب التصميم التابعة لها عام 1968، وذلك بهدف استخدام تقييم المخاطر الشامل للمحطة لتحسين تصميم مفاعل الماء الثقيل لتوليد البخار بقدرة 500 ميغاواط. وأظهرت هذه الدراسة أن تحليل شجرة الأحداث (ETA) يُبسّط التحليل إلى شكل قابل للإدارة. لم يتم تطوير تحليل شجرة الأحداث (ETA) في البداية خلال دراسة WASH-1400، بل كانت هذه إحدى الحالات الأولى التي استُخدم فيها على نطاق واسع. اعتمدت دراسة هيئة الطاقة الذرية البريطانية (UKAEA) على افتراض أن أنظمة الحماية إما تعمل أو تفشل، مع حساب احتمالية الفشل لكل طلب باستخدام أشجار الأعطال أو طرق تحليل مماثلة. يُحدد تحليل شجرة الأحداث (ETA) جميع التسلسلات التي تلي حدثًا مُحفزًا. ويمكن استبعاد العديد من هذه التسلسلات من التحليل لأن تكرارها أو تأثيرها ضئيل جدًا بحيث لا يؤثر على النتيجة الإجمالية. ورقة بحثية قُدّمت في ندوة CREST في ميونخ،

1-4-5 النظرية والمنهجية

يبدأ إجراء تقييم المخاطر الاحتمالية بمجموعة من الأحداث الأولية التي تُغير حالة النظام أو تكوينه. الحدث الأولي هو حدث يُطلق رد فعل، كما هو الحال مع الشرارة (الحدث الأولي) التي قد تُشعل حريقًا يؤدي إلى أحداث أخرى (أحداث وسيطة) مثل احتراق شجرة، ثم في النهاية إلى نتيجة، على سبيل المثال، أن الشجرة المحترقة لم تعد تُنتج التفاح. كل حدث أولي يُؤدي إلى حدث آخر، وهكذا دواليك، حيث يُمكن حساب احتمالية وقوع كل حدث وسيط باستخدام تحليل شجرة الأعطال، حتى الوصول إلى حالة نهائية (نتيجة عدم إنتاج الشجرة للتفاح).

تُقسّم الأحداث الوسيطة عادةً إلى ثنائية (نجاح / فشل أو نعم/ لا)، ولكن يمكن تقسيمها إلى أكثر من اثنين طالما كانت الأحداث متنافية، أي لا يمكن أن تحدث في الوقت نفسه. إذا كانت الشرارة هي الحدث المُسبِّب، فهناك احتمال أن تُشعل الشرارة حريقًا أو لا تُشعله (ثنائي نعم أو لا)، بالإضافة إلى احتمال أن ينتشر الحريق إلى شجرة أو لا ينتشر إليها. تُصنَّف الحالات النهائية إلى مجموعات، قد تكون نجاحات أو شدة عواقب. مثال على النجاح هو عدم اندلاع حريق واستمرار الشجرة في إنتاج التفاح، بينما مثال شدة

العواقب هو اندلاع حريق وفقدان التفاح كمصدر للغذاء. يمكن أن تكون حالات الخسارة النهائية أي حالة في نهاية المسار تُمثل نتيجة سلبية للحدث المُسبِّب. تعتمد حالة الخسارة النهائية بشكل كبير على النظام، على سبيل المثال، إذا كنت تقيس عملية جودة في مصنع، فإن حالة الخسارة النهائية ستكون إعادة تصنيع المنتج أو التخلص منه. بعض حالات الخسارة النهائية الشائعة:

- الخسائر في الأرواح أو الإصابات/الأمراض بين الأفراد
- تلف أو فقدان المعدات أو الممتلكات (بما في ذلك البرامج)
- أضرار غير متوقعة أو جانبية نتيجة للاختبارات
- فشل المهمة
- انقطاع توافر النظام
- أضرار بيئية

إن الهدف العام لتحليل شجرة الأحداث هو تحديد احتمالية النتائج السلبية المحتملة التي قد تُسبب ضررًا والناتجة عن الحدث المُبدئ المُختار. من الضروري استخدام معلومات تفصيلية حول النظام لفهم الأحداث الوسيطة، وسيناريوهات الحوادث، والأحداث المُبدئية لبناء مخطط شجرة الأحداث. تبدأ شجرة الأحداث بالحدث المُبدئ، حيث تتبع عواقب هذا الحدث بطريقة ثنائية (نجاح/فشل). يُنشئ كل حدث مسارًا تحدث فيه سلسلة من النجاحات أو الإخفاقات، حيث يُمكن حساب الاحتمالية الإجمالية لحدوث هذا المسار.

يمكن حساب احتمالات الفشل للأحداث الوسيطة باستخدام تحليل شجرة الأعطال، ويمكن حساب احتمال النجاح من المعادلة:

احتمال النجاح (ps) + احتمال الفشل (pf) =1

على سبيل المثال، في المعادلة (pf) + (ps) =1، إذا علمنا أن $pf = 0.1$ من تحليل شجرة الأعطال، فيمكننا من خلال الجبر البسيط إيجاد قيمة ps، حيث $ps = 1-$ (pf) $= 0.9$.

يُمثل مخطط شجرة الأحداث جميع المسارات الممكنة انطلاقاً من الحدث المُبدئ. يبدأ الحدث المُبدئ من اليسار بخط أفقي يتفرع رأسيًا. يُمثل الفرع الرأسي نجاح / فشل الحدث المُبدئ. في نهاية الفرع الرأسي، يُرسم خط أفقي في الأعلى والأسفل يُمثل نجاح أو فشل الحدث الأول، حيث يُكتب وصف (عادةً نجاح أو فشل) مع علامة تُمثل المسار، مثل s_1 حيث s تعني نجاح و1 هو رقم الحدث، وبالمثل f_1 حيث 1 هو رقم الحدث وf تعني فشل (انظر الرسم التوضيحي في الشكل 6-). تستمر هذه العملية حتى الوصول إلى الحالة

النهائية. عند وصول مخطط شجرة الأحداث إلى الحالة النهائية لجميع المسارات، تُكتب معادلة احتمالية النتيجة.

2-4-5 خطوات إجراء تحليل شجرة الأحداث

1. تحديد النظام: تحديد العناصر المطلوبة أو تحديد حدود النظام.
2. تحديد سيناريوهات الحوادث: إجراء تقييم للنظام لتحديد المخاطر أو سيناريوهات الحوادث ضمن تصميم النظام.
3. تحديد الأحداث المُسببة: استخدام تحليل المخاطر لتحديد الأحداث المُسببة.
4. تحديد الأحداث الوسيطة: تحديد التدابير المضادة المرتبطة بكل سيناريو.

بناء مخطط شجرة الأحداث.

- حساب احتمالات فشل الأحداث: في حال تعذر حساب احتمال الفشل، يُستخدم تحليل شجرة الأعطال لحسابه.
- تحديد مخاطر النتائج: حساب الاحتمال الإجمالي لمسارات الأحداث وتحديد مستوى المخاطر.
- تقييم مخاطر النتائج: تقييم مخاطر كل مسار وتحديد مدى قبوله.
- التوصية بإجراءات تصحيحية: في حال عدم قبول مخاطر نتائج أحد المسارات، يتم تطوير تغييرات في التصميم لتعديل مستوى المخاطر.
- توثيق وقت الوصول المتوقع: توثيق العملية كاملةً على مخططات شجرة الأحداث وتحديثها عند الحاجة.

المفاهيم الرياضية

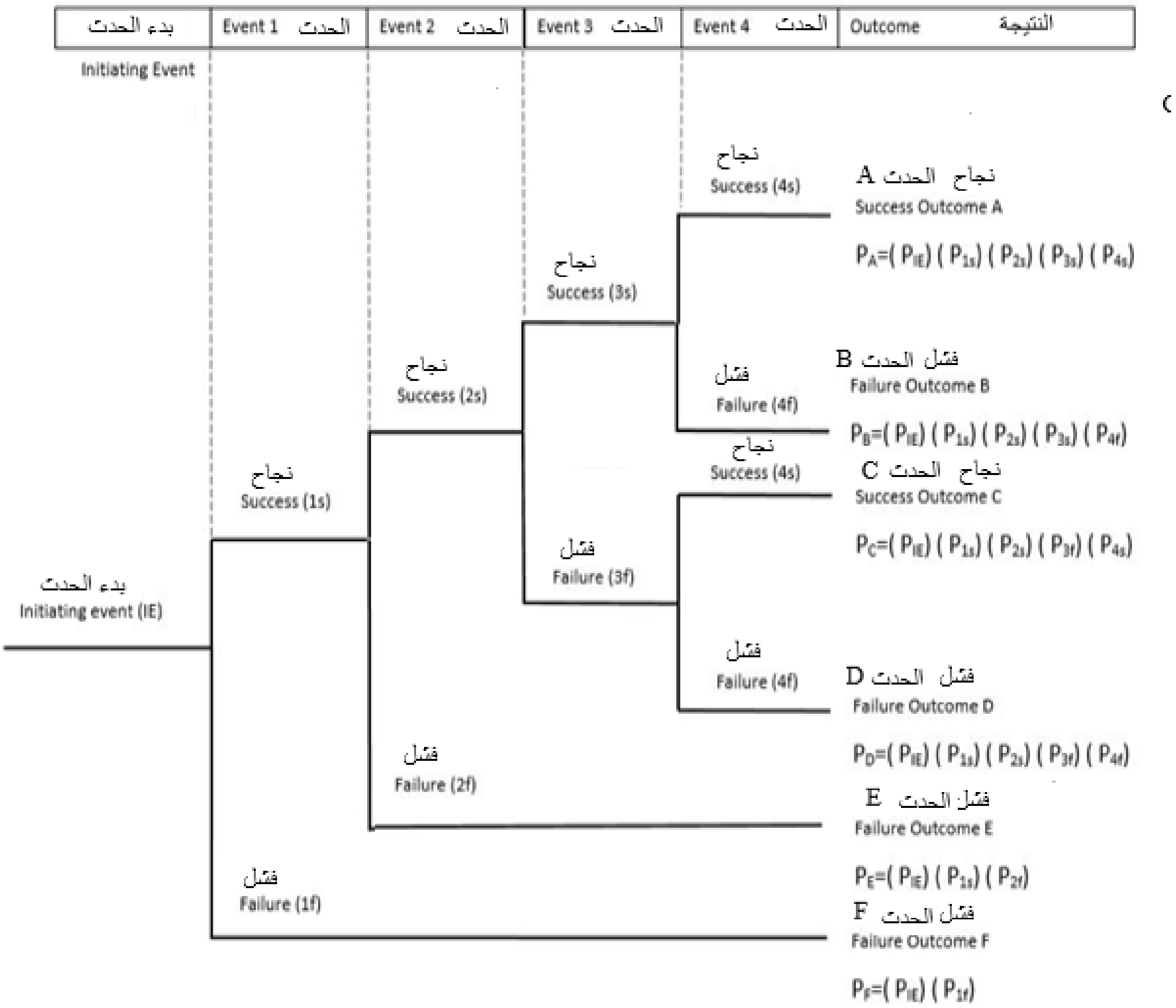
1 = (احتمال النجاح) + (احتمال الفشل)

يمكن استنتاج احتمال النجاح من احتمال الفشل.

احتمال المسار الإجمالي = (احتمال الحدث 1) × (احتمال الحدث 2) × ... × (احتمال الحدث ن)

3-4-5 تطبيق طريقة شجرة الأحداث The event tree على شبكات توزيع القدرة الكهربائية

إن معايير نجاح النظام هي أن يتم توصيل الطاقة الكهربائية إلى جميع الأحمال ، و لتقييم وثوقية النظام باستخدام طريقة تعداد الحالات حيث يمكن إنشاء **شجرة أحداث** التي توضح جميع التوليفات الممكنة لحالات

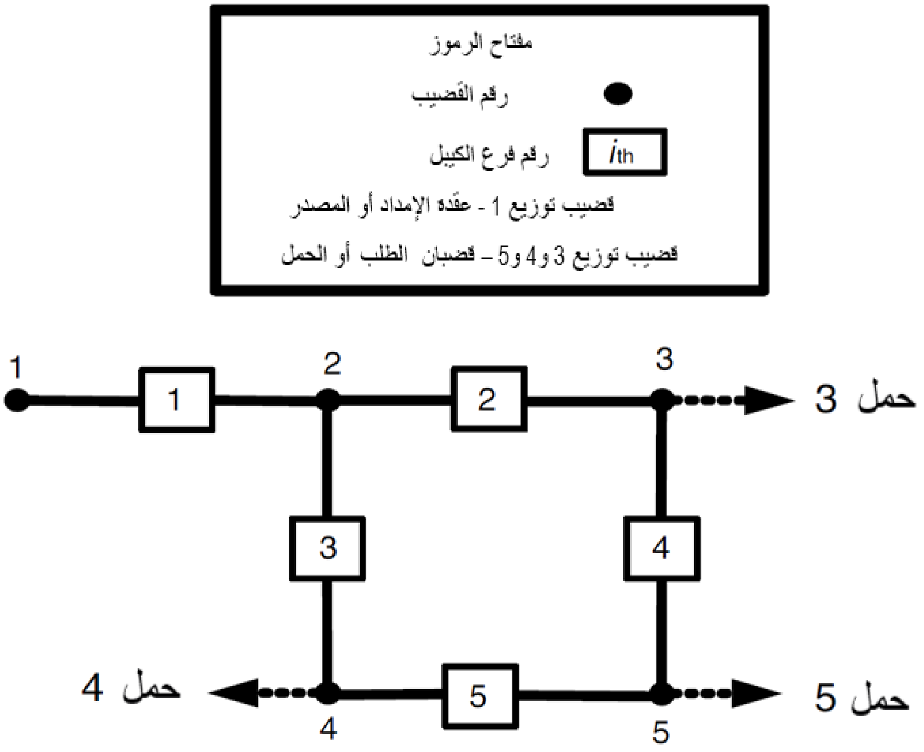


الشكل 5- 14 مخطط شجرة الأحداث التوضيحي.

إن معايير نجاح النظام هي أن يتم توصيل الطاقة الكهربائية إلى جميع الأحمال ، و لتقييم وثوقية النظام باستخدام طريقة تعداد الحالات حيث يمكن إنشاء **شجرة أحداث** التي توضح جميع التوليفات الممكنة لحالات المكونات في النظام كما هو مبين في الشكل 5-14 . يمكن أن يكون كل فرع من فروع الكيبل في حالتين متنافيتين إما تشغيلية (متصلة) أو معطلة (غير متصلة). يوجد 32 فرعًا ممكنًا في مخطط الشجرة ، مع ذلك، غالبًا ما يكون التعداد الشامل لجميع الحالات الممكنة غير ضروري.

مثال5-7 :

يوضح الشكل 5-15 مخططًا أحادي الخط لنظام توزيع هيئة كهرباء.



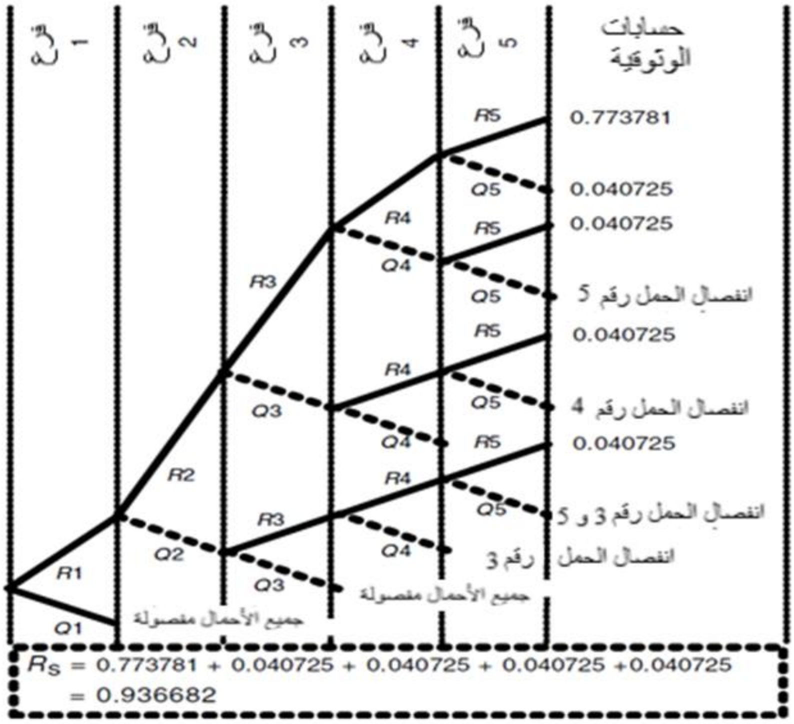
الشكل 5-15نظام توزيع كهربائي توضيحي.

يمكن حساب وثوقية النظام بجمع الاحتمالات المرتبطة بجميع الفروع العاملة. إذا افترضنا أن وثوقية كل فرع من فروع الكيبلات هي 0.95، فإن وثوقية النظام Rs هي

$$R_s = \sum_{i=1}^{5} R(\text{branch}_i) = 0.936682$$

حيث n = 5

$$R(\text{branch}(1)) = R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = 0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 = 0.773781$$
$$R(\text{branch}(2)) = R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times Q5 = 0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.05 = 0.040725$$
$$R(\text{branch}(3)) = R1 \times R2 \times R3 \times Q4 \times R5 = 0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.05 \times 0.95 = 0.040725$$
$$R(\text{branch}(4)) = R1 \times R2 \times Q3 \times R4 \times R5 = 0.95 \times 0.95 \times 0.05 \times 0.95 \times 0.95 = 0.040725$$
$$R(\text{branch}(5)) = R1 \times Q2 \times R3 \times R4 \times R5 = 0.95 \times 0.05 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 = 0.040725$$

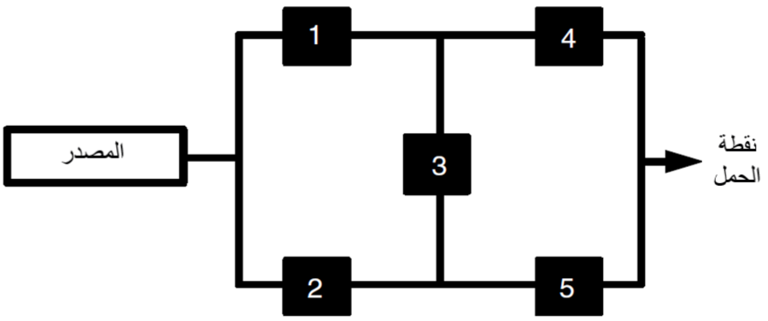


الشكل 5-16 مخطط شجرة الأحداث لتعداد حالات شبكة التوزيع في الشكل 5-15.

مثال 5-8:

تطبيق شجرة الأحداث على الشبكة القنطرية:

يوضح الشكل 5-17 مخططًا أحادي الخط لنظام توزيع شركة كهرباء على شكل شبكة قنطرية .



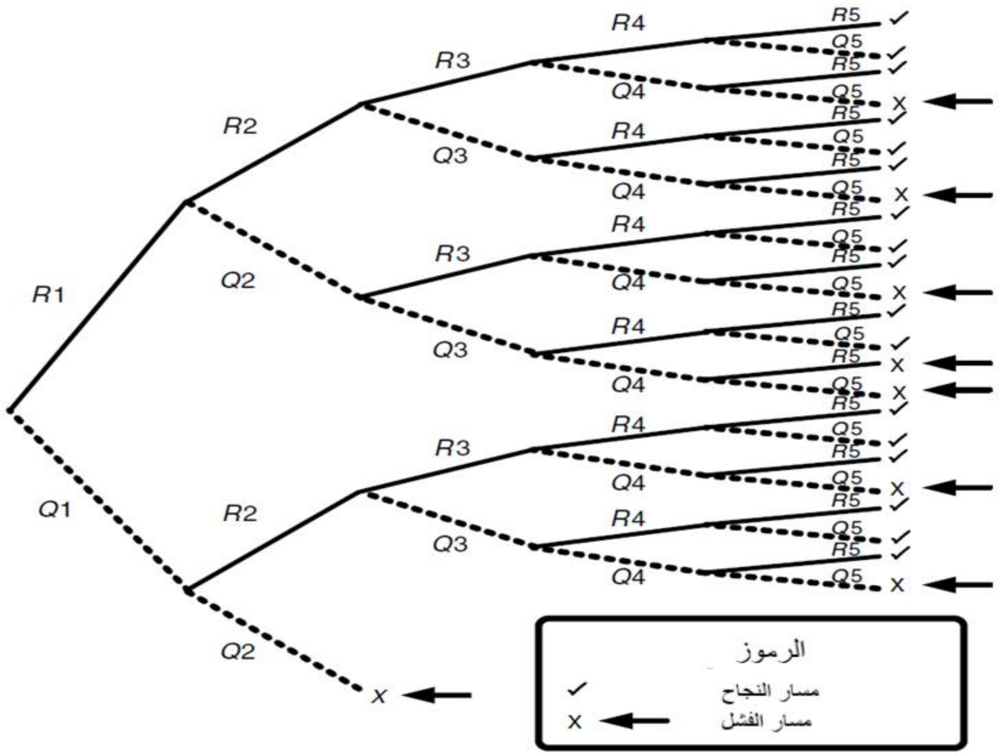
الشكل 5-17 شبكة قنطرة توضيحية.

كما يوضح الشكل 5-18 شجرة الأحداث الخاصة بالشكل5-17.

جد وثوقية النظام بفرض أن وثوقية كل مكون هي 0.95، وأن

$$R1 = R2 = R3 = R4 = R5 = R$$

وكذلك $Q_i = 1\text{-}R_i$ حيث i هو رقم المكون.



الشكل 5-18 مخطط شجرة الأحداث لتعداد حالات شبكة القنطرة.

على هذا الأساس تُعطى وثوقية النظام كالآتي :

$$R_s = R^5 + 5R^4Q + 8R^3Q^2 + 2R^2Q^3 = 2R^2 + 2R^3 - 5R^4 + 2R^5$$
$$R_s = 0.994781$$

5-5 تطبيق نظرية الاحتمال الشرطي على تكوينات تشغيل النظام

هناك العديد من المواقف التي تعتمد على وقوع حدثين بحيث يعتمد وقوع أحدهما على وقوع الآخر. على سبيل المثال، لنفترض أننا نراقب غطاءً سحابيًا في منطقة معينة ونتساءل عما إذا كان سيهطل المطر أم لا.

إذا رمزنا لحدث "المطر" بالحدث A، ولحدث وجود "غطاء سحابي" بالحدث B، فإننا مهتمون بمعرفة احتمال هطول المطر (أي الحدث A) مع العلم بوجود غطاء سحابي (أي الحدث B) فوق منطقة معينة. ويمكن التعبير عن ذلك أيضًا بـ "مع العلم بوجود غطاء سحابي".

رياضيًا، يُعرَّف الاحتمال الشرطي لهطول المطر بشرط وجود غطاء سحابي على النحو التالي:

$$P(A/B)$$

حيث يُقرأ الخط العمودي (|) بين A و Bعلى أنه "معطى given that "

لنفترض أننا لاحظنا أن 10% من الوقت يكون "ممطرًا" وتكون هناك غيوم، أو رياضيًا:

$$P(A \cap B) = 0.10$$

لنفترض أننا لاحظنا أيضًا أن الغطاء السحابي يغطي 40% من الوقت، أو رياضيًا

$$P(B) = 0.40$$

لذلك، خلال فترة 100 يوم، ستكون السماء مغطاة بالغيوم لمدة 40 يومًا، وستكون السماء ممطرة مع وجود غيوم لمدة 10 أيام. تخيل احتمالات كل حدث على أنها تمثل نسبة مئوية محددة من مجموعة معروفة (مثل 100 يوم). في هذا المثال المحدد، المجموعة الفرعية المعروفة هي وجود غيوم (أي الحدث B) لمدة 40 يومًا، ونحن مهتمون بنسبة أو عدد الأيام التي ستشهد هطول أمطار (أي الحدث A) مع وجود غيوم.

P(A/B) = عدد الأيام الممطرة مع غطاء سحابي / عدد الأيام الغائمة

$$= \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \times \frac{100}{100} = \frac{10}{40} = 0.25$$

لذلك، نستنتج أن المطر سيهطل بنسبة 25% من الوقت إذا كانت هناك غيوم.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

إن احتمال وقوع حدثين A و B في آن واحد يساوي حاصل ضرب احتمال وقوع B في الاحتمال الشرطي لوقوع A بشرط وقوع B

$$P(A \cap B) = P(B)P(A|B)$$

أو أن احتمال وقوع الحدثين A وB معًا يساوي أيضًا حاصل ضرب احتمال A في الاحتمال الشرطي لـ B بشرط وقوع A

$$P(A \cap B) = P(A)P(B|A)$$

مثال 5-9 :

(الاحتمالات الشرطية)

يحتوي مستودع على ثمانية محولات كهربائية، اثنان منها من صنع مصنع محلي . إذا تم اختيار محولين عشوائيًا (أي باحتمال متساوٍ) واحدًا تلو الآخر من المستودع، فما هو احتمال اختيار المحولين المحليين الصنع للمهمة؟

لنفترض أن A هو حدث اختيار أول محول محلي الصنع، وB هو حدث اختيار ثاني محول محلي الصنع.

احتمالية A هي ببساطة 8/2 أو 4/1. بمجرد اختيار المحول الأول، تتغير احتمالية اختيار المحول الثاني وتعتمد على شرط اختيار المحول الأول. مع بقاء سبعة محولات في المستودع بعد اختيار أول محول محلي الصنع، تصبح احتمالية اختيار ثاني محول محلي الصنع 7/1.

$$P(A \cap B) = P(A)P(B|A) = (1/4)(1/7) = 1/28 = 0.03571428571$$

5-6 الأحداث الشرطية المتنافية

هناك العديد من الحالات التي يكون فيها حدث واحد (A) مشروطًا أو يعتمد على وقوع عدد "n " من الأحداث الفردية و(B)، وهي أحداث متنافية. ويمكن التعبير عن احتمال وقوع حدث واحد (A) على النحو التالي:

$$P(A) = \sum_{i=1}^{n} P(A|B_i)P(B_i)$$

في هندسة الوثوقية، يُعرَّف الحدث A غالبًا بأنه تشغيل ناجح للنظام (أي، يُشار إليه بـ SS أي نجاح). يُعرَّف احتمال نجاح النظام (أي، $P(A) = P(SS) = Rs$) بأنه وثوقية النظام. فإذا افترضنا أن مكونًا واحدًا (مثلًا، المكون 1) موجود في إحدى الحالتين المتنافيتين (أي، $n = 2$)، وهما حالة التشغيل وحالة الفشل، فلنُعرِّف الحدث B1 بأنه حالة تشغيل المكون (مثلًا، حالة جيدة، حالة تشغيل، إلخ) والحدث B2 بأنه حالة فشل المكون (مثلًا، حالة سيئة، حالة توقف، إلخ). عندئذٍ

$$P(A) = P(A|B_1)P(B_1) + P(A|B_2)P(B_2)$$

$$R_s = P(SS|\text{component 1 is up})R_1 + P(SS|\text{component 1 is down})Q_1$$

أي أن :

R_s = (P(SS / اشتغال المكون 1× R_1 + (P(SS / عطل المكون 1× Q_1

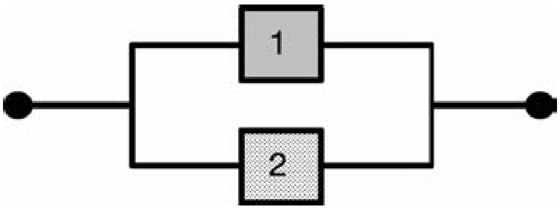
حيث R_1 هي احتمالية اشتغال المكون 1، وQ_1 هي احتمالية عطل المكون 1.

ملاحظة: $R_1 + Q_1 = 1.0$

مثال 5- 10 :

يوضح الشكل 5- 19 نظامًا يتكون من مكونين متصلين على التوازي. احسب وثوقية تكوين الشبكة. علماً أن معيار نجاح النظام: يجب أن يعمل مكون واحد على الأقل لضمان نجاح النظام.

ملاحظة: "على الأقل" تعني تشغيل مكون واحد أو أكثر (أي تشغيل مكون واحد أو أكثر، على سبيل المثال: تشغيل المكون 1 أو تشغيل المكون 2 أو تشغيل كليهما).



الشكل 5-19 تكوين النظام: كتلتان متصلتان على التوازي.

الحل:

R_s = P(SS / اشتغال المكون 1) × R_1 + P(SS / عطل المكون 1) × Q_1

P(SS / اشتغال المكون 1) = 1.0

P(SS / عطل المكون 1) = R_2

$$R_s = R_1 + R_2Q_1 = R_1 + R_2(1 - R2) = R_1 + R_2 - R_1R_2$$

لاحظ أن : $R_1+Q_1=,1.0 = R_2+ Q_2$.

مثال 5- 11:

يوضح الشكل 5-20 نظامًا يتكون من عنصرين متصلين على التوالي وفقًا لمخططاتهما الكتلية. احسب موثوقية تكوين الشبكة.

الشكل 5-20 تكوين النظام: مخططان كتلتان متصلتان على التوالي.

الحل :

معيار نجاح النظام: يجب أن يعمل كلا المكونين لتحقيق نجاح النظام.

$R_2 = 1$ اشتغال المكون 1 /P(SS)

0.0 = 1 عطل المكون 1 /P(SS)

$$R_s = R_1R_2 + (0.0)Q_1 = R_1R_2$$

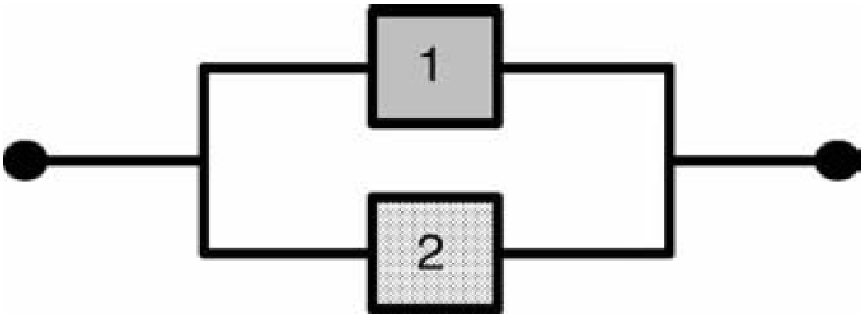
لقد استند نهج الوثوقية المُطبق في المثالين السابقتين إلى معيار نجاح النظام. وبدلاً من ذلك، يمكن تقييم المثالين نفسيهما بحل الاحتمالات الشرطية بناءً على معايير فشل النظام. سيُرمز لفشل النظام بـ SF، وسيُعرف احتمال فشل النظام بـ Qs (أي Rs + Qs = 1.0).

مثال 5-12 :

(معايير فشل النظام)

يوضح الشكل 5-21 نظامًا يتكون من عنصرين موصولين على التوازي. احسب وثوقية تكوين الشبكة بناءً على معيار فشل النظام.

معيار فشل النظام: يجب أن يفشل كلا العنصرين ليحدث فشل في النظام.



لشكل 5-21 تكوين النظام: مخططان كتلتان متصلتان على التوازي.

الحل:

معيار فشل النظام: يجب أن يفشل كلا العنصرين ليحدث فشل في النظام.

$$P(\text{SF}|\text{ المكون 1 لا يعمل })Q_1 + P(\text{SF}|\text{ المكون 1 يعمل })R_1 = Q_s$$

$$Q_s = P(\text{SF}|\text{component 1 is up})R_1 + P(\text{SF}|\text{component 1 is down})Q_1$$

$$P(\text{SF}|\text{ المكون 1 يعمل }) = 0.0$$
$$P(\text{SF}|\text{ المكون 1 لا يعمل }) = Q_2$$
$$Q_s = (0.0)R_1 + Q_2Q_1 = Q_1Q_2$$
$$R_s = 1 - Q_s = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) = R_1 + R_2 - R_1R_2$$

مثال 5-13 :

(معايير فشل النظام)

يوضح الشكل 5-22 نظامًا يتكون من عنصرين موصولين على التوالي. احسب وثوقية تكوين الشبكة بناءً على معايير فشل النظام.

الشكل 5-22 تكوين النظام: مخططان متصلان على التوالي.

معيار فشل النظام: يجب أن يفشل أحد المكونات أو كلاهما للتسبب في فشل النظام

$$Q_s = P(\mathrm{SF}|\text{component 1 is up})R_1 + P(\mathrm{SF}|\text{component 1 is down})Q_1$$

$$P(\mathrm{SF}|\text{المكون 1 يعمل}) = Q_2$$
$$P(\mathrm{SF}|\text{المكون 1 لا يعمل}) = 1.0$$
$$Q_s = Q_2R_1 + (1.0)Q_1 = (1-R_2)R_1 + (1-R_1) = R_1 - R_1R_2 + 1 - R_1 = 1 - R_1R_2$$

عليه فان :

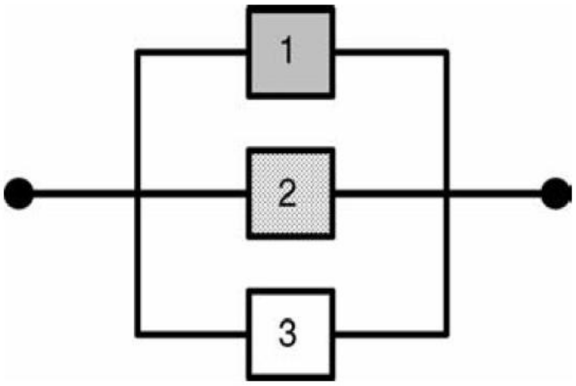
$$Rs = 1 - Qs = R_1R_2$$

مثال 5-14:

(معايير نجاح النظام)

يُظهر الشكل 5-23 نظامًا يتكون من ثلاثة مكونات، مخططاتها متصلة على التوازي. احسب وثوقية تكوين الشبكة بناءً على معايير نجاح النظام.

معيار نجاح النظام: يجب أن يعمل مكون واحد على الأقل لضمان نجاح النظام.



الشكل 5-23 تكوين النظام: ثلاثة مخططات كتلية متصلة على التوازي.

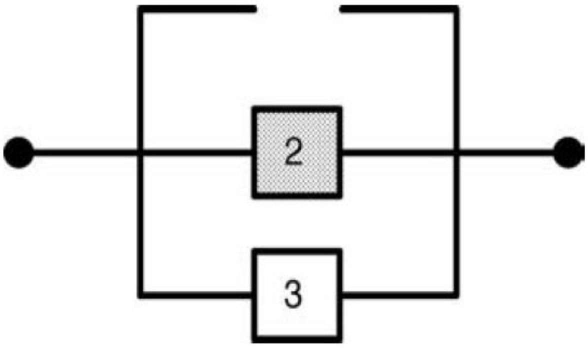
الحل:

$$R_s = P(\text{SS}|\text{component 1 is up})R_1 + P(\text{SS}|\text{component 1 is down})Q_1$$

$$P(\text{SS}|\text{component 1 is up}) = 1.0$$

$$P(\text{SS}|\text{component 1 is down}) = ?$$

أي أنه في حالة تعطل المكون 1، يتم تقليص تكوين الشبكة إلى تكوين الشبكة التالي (أي النظام الفرعي) (الشكل5-24):



الشكل 5-24 تكوين النظام: ثلاثة مخططات كتلية متصلة على التوازي، مع إعطاء المكون 1 معطل.

$$P(\text{SS}|\text{component 1 is down}) = P(\text{SS}|\text{component 2 is up})R_2 + P(\text{SS}|\text{component 2 is down})Q_2$$
$$P(\text{SS}|\text{component 2 is up}) = 1.0$$
$$P(\text{SS}|\text{component 2 is down}) = R_3$$
$$P(\text{SS}|\text{component 1 is down}) = (1.0)R_2 + R_3Q_2$$

وبإدخال هذه النتائج في المعادلة أعلاه نحصل على

$$\begin{aligned} R_s &= P(\text{SS}|\text{component 1 is up})R_1 + P(\text{SS}|\text{component 1 is down})Q_1 \\ R_s &= (1.0)R_1 + [(1.0)R_2 + R_3Q_2]Q_1 \\ &= R_1 + [R_2 + R_3(1 - R_2)][1 - R_1] \\ R_s &= R_1 + R_2 + R_3 - R_1R_2 - R_2R_3 - R_3R_1 - R_1R_2R_3 \end{aligned}$$

الفصل 6

تقييم وثوقية نظام التوليد

1-6 مقدمة

يُعدّ تقييم وثوقية منظومات القدرة الكهربائية مسألة أساسية وحيوية في تخطيط وتصميم وتشغيل أنظمة الطاقة. يتكون نظام الطاقة الكهربائية من مجموعة من المكونات المترابطة فيما بينها بطريقة هادفة وذات مغزى. يهدف تقييم الوثوقية إلى استخلاص مقاييس ومعايير ومؤشرات مناسبة للأداء الموثوق به والمعتمد عليه، وذلك بناءً على بيانات انقطاع عن عمل المكونات وتكوينها. لتقييم وثوقية التوليد ، تُعتبر وحدات التوليد وتكوين النظام من المكونات ذات الأهمية، والتي تشير إلى الوحدة (أو الوحدات) المحددة التي يتم تشغيلها لتلبية الحمل الحالي أو المستقبلي. أما المؤشرات المستخدمة لقياس الوثوقية المُولّدة فهي تقديرات احتمالية لقدرة تكوين توليد معين على تلبية طلب الحمل. من الأفضل فهم هذه المؤشرات على أنها تقييم لكفاية التوليد على مستوى النظام ككل، وليست مقاييس مطلقة لوثوقية النظام.

تتأثر المؤشرات بعوامل أساسية مثل حجم الوحدة وتوافرها، وتكون مفيدة للغاية عند مقارنة الوثوقية النسبية لتكوينات التوليد المختلفة. ويُعتبر النظام يعمل بنجاح إذا كانت هناك سعة توليد كافية (احتياطي مناسب) لتلبية ذروة الحمل (أقصى طلب). ولتحقيق ذلك : أولًا، يتم دمج نموذج التوليد ونموذج الحمل (دمجهما معًا) للحصول على مخاطر نقص الإمداد في النظام. ثانيًا، تُستخدم التقديرات الاحتمالية لمخاطر النقص كمؤشرات لتقييم وثوقية نظام الطاقة الرئيسي للتكوين المدروس.

وتُعدّ الوثوقية أحد أهم المعايير التي يجب مراعاتها خلال جميع مراحل تخطيط وتصميم وتشغيل أنظمة الطاقة. ويلزم وجود معيار للوثوقية لتحديد مستويات الوثوقية المستهدفة، ولتحليل ومقارنة مستويات الوثوقية المستقبلية باستمرار مع خطط التوسع البديلة الممكنة. وقد أدت هذه الحاجة إلى تطوير تقنيات شاملة لتقييم الوثوقية ونمذجتها . وكأداة لتقييم وثوقية أنظمة الطاقة في تخطيط توسعة التوليد وإنتاج الطاقة، تُعتمد ثلاثة مؤشرات أساسية على نطاق واسع.

المؤشر الأول للوثوقية هو فقدان الحمل المتوقع (LOLE)، والذي يشير إلى متوسط عدد الأيام المتوقعة سنويًا التي يكون فيها النظام في حالة انقطاع أي عندما يتجاوز الحمل قدرة التوليد المتاحة. أما المؤشر الثاني فهو الطلب المتوقع غير المُلبّى Expected Demand Not Supplied (EDNS) أو إختصاراً (ϵDNS)، والذي يقيس حجم الحمل المفقود نتيجةً لحدوث انقطاعات شديدة.

المؤشر الثالث هو الطاقة المتوقعة غير المُجهزة Expected Energy Not Supplied (EENS) أو إختصاراً (ϵENS)، ويُعرَّف بأن الكمية المتوقعة من الطاقة التي لن تُجهز من وحدة (وحدات) التوليد الموجودة في النظام خلال الفترة المحددة نتيجةً لنقص في السعة أو انقطاعات مفاجئة شديدة في التيار الكهربائي. ويتزايد استخدام هذه المؤشرات حاليًا نظرًا لأهميتها من الناحيتين المادية والاقتصادية. وبالمقارنة مع تقييم وثوقية التوليد، توجد أيضًا مؤشرات وثوقية مرتبطة بتقييم وثوقية الشبكة (النقل والتوزيع).

كذلك ،هناك مفهومان أساسيان يُؤخذان عادةً في الاعتبار عند تقييم وثوقية الشبكة، وهما: انتهاك الجودة وانتهاك الاستمرارية. يُراعي المعيار الأول انتهاك حدود الجهد (الفولتية) وانتهاك تصنيف الخط أو سعته الاستيعابية، بينما يفترض المعيار الثاني أن الخطوط ذات سعة غير محدودة بحيث يمكن تحليل شبكات النقل والتوزيع بطريقة مشابهة للطريقة المستخدمة في تقييم وثوقية التوليد، أي احتمال عدم ضمان استمرارية الطاقة. وهذا من شأنه أن يُبسط حساب التردد والمدة في الشبكة وهو أمر ضروري. وبمعرفة مؤشرات وثوقية المكونات المناسبة، يُصبح من السهل نسبيًا حساب معدل الفشل المتوقع (λ) للنظام، ومتوسط مدة الانقطاع (r)، وعدم التوافرية (U). وللقيام بذلك، يلزم معرفة قيم λ وr وU لكل مكون من مكونات النظام .

2-6 طرق تقييم وثوقية نظام التوليد

في جميع دراسات أنظمة القدرة الكهربائية ، تُقسّم الفترة الزمنية إلى فترتين:

1. فترة التخطيط Planning period
2. فترة التشغيل Operation period

وفي دراسات وثوقية نظام التوليد، يُجرى التقسيم نفسه؛ أي:

1. بالنسبة لفترة التخطيط، لدينا:
   - تقييم وثوقية قدرة التوليد الساكنة (الثابتة)

Static generating capacity reliability evaluation

2. بالنسبة لفترة التشغيل، لدينا:
   - تقييم وثوقية قدرة التوليد الدوارة (الاحتياطي الدوار)

Spinning generating capacity reliability evaluation (spinning reserve)

3. احتياطي التوليد :

- في الدراسات الساكنة (الثابتة) : يجب توفير الاحتياطي للأسباب التالية:
  - انقطاع التيار المجدول أو للصيانة

o انقطاع التيار القسري أو غير المخطط له أو غير المجدول

o زيادة الأحمال بما يتجاوز التوقعات

- في الدراسات الدوارة: يجب توفير الاحتياطي للأسباب التالية:

o انقطاع التيار القسري

o عدم اليقين في توقعات الأحمال

في هذه المجموعة من الملاحظات، سيتم النظر فقط في تقييم الوثوقية الثابتة أو الساكنة.

تقييم وثوقية القدرة التوليدية الثابتة

يوجد طريقتان لتقييم وثوقية القدرة الثابتة:

1- الطريقة الحتمية (غير الاحتمالية) The deterministic (non- probabilistic) method

2- الطريقة الاحتمالية The probabilistic approach

الطريقة الحتمية (غير الاحتمالية):

في الطريقة الحتمية، توجد قاعدتان تقريبيتان أو طريقتان غير احتماليتين شائعتان:

(أ) هامش الاحتياطي المئوي The percentage reserve margin

(ب) إضافة وحدة توليدية أكبر One additional largest unit

لا تأخذ هاتان الطريقتان في الحسبان اختلافات حجم النظام، أو خصائص الأحمال المختلفة، أو تأثير اختلاف حجم ونوع الوحدات. وبالتالي، قد يختلف احتمال عدم تلبية نظامين لاستهلاك الطاقة، حتى لو كانا يمتلكان نسبة الاحتياطي نفسها ، اختلافًا كبيرًا.

في كل من الطرق الحتمية والاحتمالية، يجب أولاً إنشاء جدول باحتمال انقطاع السعات التوليدية عن الخدمة والذي يعرف بنموذج التوليد outage probability of the capacities . وفي هذا الفصل سيتم التركيز على الطريقة الحتمية deterministic في تقييم وثوقية التوليد ، أما طريقة الإحتمالية فيتم شرحها في الفصل التاسع القادم.

3-6 أنواع الإنقطاعات الأنظمة الكهربائية ونقص امداد الطاقة

يجب أن يأخذ نموذج توليد الطاقة بالجملة في الاعتبار حجم احتياطي التوليد وحالات انقطاع الطاقة الشديدة. ويؤدي انقطاع الطاقة في وحدة التوليد إلى إخراجها من الخدمة لإصلاحها أو استبدالها. يمكن أن

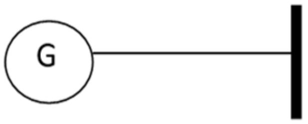
تؤثر هذه الانقطاعات على قدرة النظام على تلبية الحمل، وبالتالي على وثوقية النظام. وقد يتسبب انقطاع الطاقة في انقطاع الخدمة أو لا وذلك حسب هوامش التوليد المتاحة. وتحدث الانقطاعات أيضًا عندما تخضع الوحدة للصيانة أو غيرها من الأعمال المخططة اللازمة للحفاظ على تشغيلها في حالة جيدة.

في العموم ، يمكن تصنيف الانقطاعات إلى فئتين:

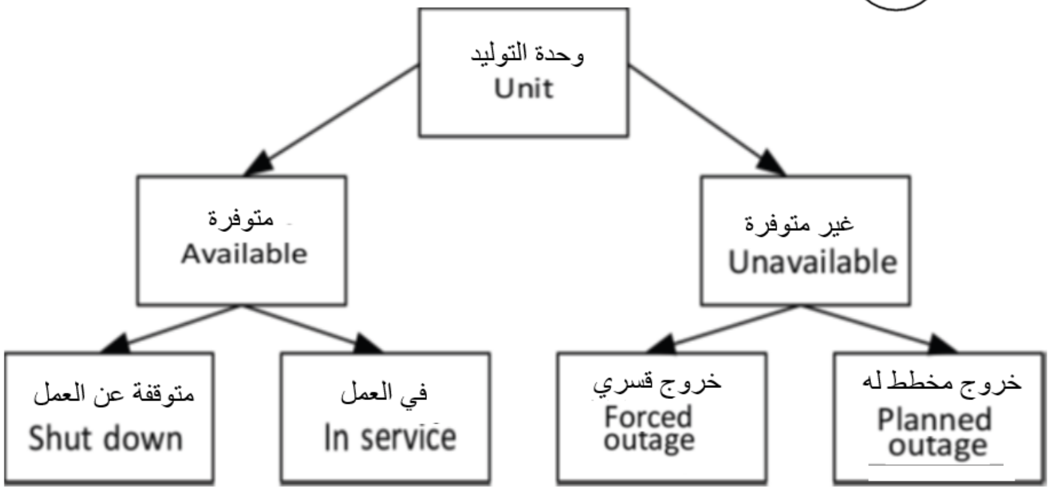
• انقطاع مُخطط له ينتج عن إخراج أحد المكونات من الخدمة عمدًا عادةً لأغراض الإصلاح الوقائي أو الصيانة المُجدولة (الوقائية).

• انقطاع قسري ينتج عن ظروف طارئة ومفاجئة، مما يُجبر وحدة التوليد على الخروج من الخدمة.

يُوصَف وضع وحدة التوليد بأنه يتحول إلى إحدى الحالات الممكنة العديدة، كما هو موضح في الشكل 6-1. ولدراسة تأثير الوحدة على وثوقية توليد النظام، من الضروري معرفة احتمالية وجودها في كل حالة كما هو موضح في الشكل 6-1. لذا، يُقدّم الشرح في الفقرة التالية بعض مفاهيم الاحتمالات الأساسية.



(أ)



(ب)

الشكل 6- 1 : (أ) وحدة توليد ، (ب) احتمالية حالات وحدة التوليد.

6-4 تعاريف في تقييم وثوقية أنظمة التوليد: المصطلحات والتعريفات الهامة

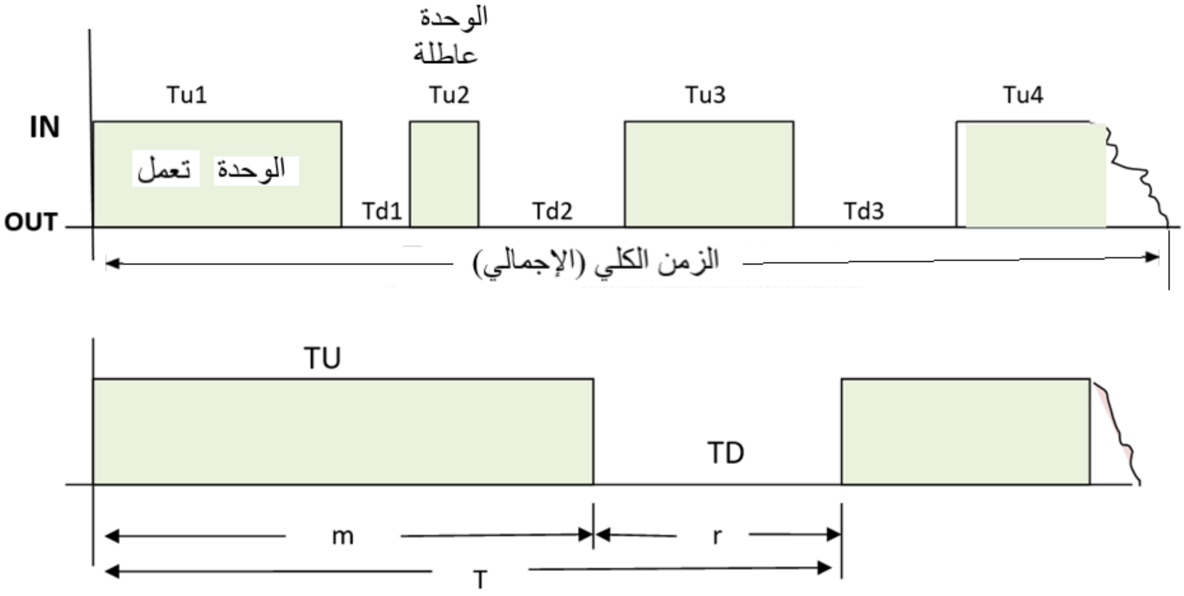
• معدل الانقطاع القسري والتوافرية : لنفترض وحدة توليد واحدة موضحة في الشكل6-1 (أ) . ولتكن مجموعة أوقات الخدمة هي ،

$$Ss = \{ Tu1 , Tu2, Tu3 , Tu4\}$$

ومجموعة فترات التوقف هي:

Sf = { Td1, Td2, Td3}

ويوضح الشكل 6-2 تاريخ عمل هذا المولد.



الشكل 6-2 مخطط يمثل سجل تاريخ عمل المولد.

بالرجوع إلى الشكل6- 2 (أ)،

متوسط وقت الخدمة T_U:

$$T_U = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_{ui}}{n_u} = m$$

متوسط وقت الإصلاح T_D

$$T_D = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_{Di}}{n_d} = r$$

لنفترض أن:

m = متوسط الوقت حتى الفشل = MTTF = $\frac{1}{\lambda}$

r = متوسط وقت الإصلاح = MTTR = $\frac{1}{\mu}$

$\frac{1}{f}$ = متوسط الوقت بين الأعطال = T = m + r

f = تردد الدورة.

يُعرَّف معدل الانقطاع القسري (FOR) على النحو التالي:

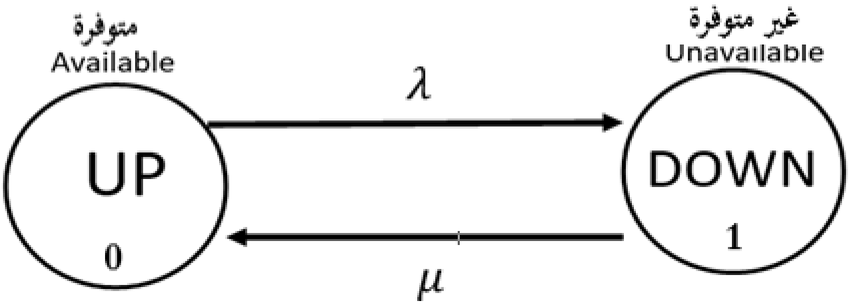
$$FOR = \frac{r}{m+r} = \frac{1/\mu}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \qquad (6.1a)$$

ويُطلق على معدل الانقطاع القسري أيضًا اسم عدم التوافر U (Unavailability).

ويُعرَّف التوافر على النحو التالي:

$$\text{التوافرية}(Availability) = \frac{m}{m+r} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \qquad (6.1b)$$

• تحديد احتمال الحالة لأحد المكونات: يُوضح الشكل 6-3 التالي احتمالية الحالة أو نموذج ماركوف لأحد المكونات



الشكل6- 3: نموذج ماركوف لمكون واحد.

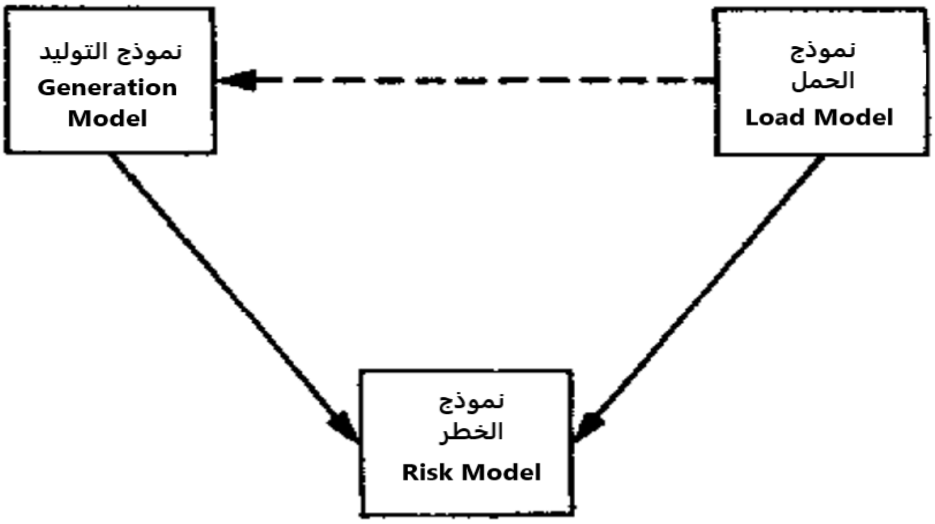
6-4-1 تقييم القدرة الثابتة وتقييم القدرة التشغيلية

يكمن الاختلاف الأساسي بين تقييم القدرة الثابتة وتقييم القدرة التشغيلية في الفترة الزمنية المعتمدة. ولذلك، توجد اختلافات جوهرية في البيانات المستخدمة في كل مجال من مجالات التطبيق. وتحتوي مراجع كثيرة على بعض التعريفات الأساسية الضرورية لتقييم وثوقية وحدة التوليد وتوافرها وإنتاجيتها بشكل متسق وشامل. في الوقت الحالي، يبدو أن فقدان احتمالية الحمل أو طريقة التوقع هي أكثر طرق الاحتمالية استخدامًا لتقييم مدى كفاءة تكوين توليد معين.

مع ذلك، توجد اختلافات عديدة في المنهجية المُستخدمة وفي العوامل المُعتبرة.في الفصل سيتم مناقشة العناصر الرئيسية في هذا الخصوص . كما يُمكن تحديد فقدان الطاقة المُتوقع باستخدام منهجية مُشابهة،

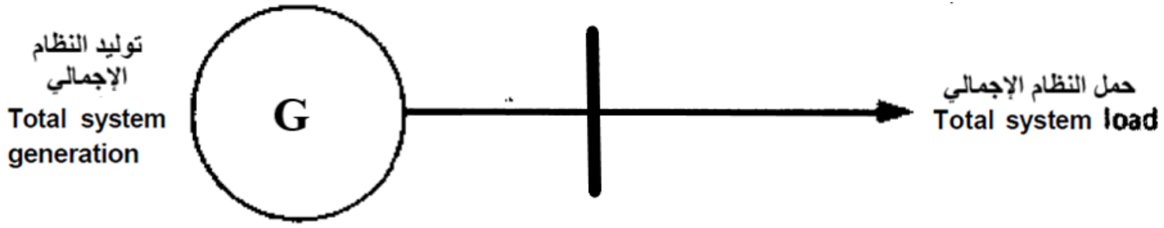
ولذلك سوف يتم تضمينه في الفصل السابع القادم. ويعرض الفصل الثامن المفاهيم الأساسية المرتبطة بطريقة التردد والمدة، ويتم تفصيل كل من فقدان الحمل وتقنية التردد والمدة في الفصل التاسع الذي يتناول تقييم وثوقية الأنظمة المترابطة.

إنّ المنهج الأساسي لتقييم كفاءة تكوين توليد معين هو نفسه جوهريًا لأي تقنية. ويتكون من ثلاثة أجزاء كما هو موضح في الشكل6-4 .



الشكل6-4: المهام المفاهيمية في توليد تقييم وثوقية القدرة

يتم دمج نماذج التوليد والحمل الموضحة في الشكل 6-4 (عملية الالتفاف) لتكوين نموذج المخاطر المناسب. ولا تتضمن المؤشرات المحسوبة عادةً قيود النقل، على الرغم من أنه قد تم توضيح كيفية تضمين هذه القيود كما أنها لا تتضمن وثوقية النقل؛ ولذلك فهي مؤشرات كفاءة النظام بشكل عام. و يُوضح تمثيل النظام في الدراسة التقليدية عادة كما في الشكل 6-5 ولا تعكس المؤشرات المحسوبة في هذه الحالة أوجه القصور في التوليد عند أية نقطة حمل عميل محددة، بل تقيس الكفاءة العامة لنظام التوليد.وستوضح تقييم نقطة الحمل المحددة لاحقًا في الفصل 9 تحت مسمى تقييم وثوقية النظام المركب.



الشكل 6-5 نموذج النظام التقليدي.

6-4-2 التوافرية (AV) ومعدل الانقطاع القسري (Forced Outage Rate (FOR

أظهرت التجارب أنه لا توجد آلة موثوقة تمامًا بحيث تكون متاحة في حالة تشغيل ناجحة طوال الوقت. وهذا يعني أن الآلة تحتاج إلى أن تكون خارج الخدمة للصيانة، أو قد تكون خارج الخدمة بسبب بعض المشاكل الأخرى التي تؤثر على تشغيلها (انظر الشكل 6-1). وعلى هذا النحو، تشمل حالة الانقطاع عن الخدمة الانقطاعات المخططة والانقطاعات القسرية. الانقطاعات المخططة (الانقطاعات المجدولة) هي تلك التي يتم فيها إيقاف تشغيل وحدة (وحدات) عمدًا أو إخراجها من الخدمة للصيانة أو الاستبدال. وتُعرَّف الانقطاعات القسرية بأنها تلك التي تكون فيها وحدة (وحدات) خارج الخدمة بسبب عطل (وتسمى أيضًا انقطاعًا غير مجدول أو غير مخطط له). يُعد الأخير العامل الأكثر خطورة وأهمية في تخطيط وتشغيل أنظمة الطاقة، ويمكن تعريفه على النحو التالي:

معدل الانقطاع القسري (FOR) = مجموع الوقت الذي تكون فيه الوحدة خارج الخدمة/ إجمالي الوقت المعتبر لخدمة الوحدة = $Td_1 + Td_2 + Td_3$ / الوقت الإجمالي

كما يمكن تعريف التوافر على النحو التالي:

التوافرية (AV) = الوقت الذي تكون فيه الوحدة قيد الخدمة / إجمالي الوقت المخصص لخدمة الوحدة

$$AV + FOR = 1.$$

يمكن ملاحظة ذلك في الشكل 6-2 كما يلي:

يمثل مصطلحا "التوافرية" و"معدل الانقطاع القسري" احتمالية وقوع حدث نجاح وحدث فشل. وفقًا لنظرية الاحتمالات، من المعروف أن حاصل ضرب AV_1 وAV_2 يمثل احتمالية تشغيل كل من الوحدة 1 والوحدة 2 في وقت واحد خلال فترة زمنية محددة، كما أن حاصل ضرب AV_1 وAV_2 وAV_3 يعني أن الوحدات 1 و2 و3 تعمل في الوقت نفسه، وأن حاصل ضرب FOR_1 وFOR_2 وFOR_3 يعني أن الوحدات 1 و2 و3 خارج الخدمة في الوقت نفسه. أيضًا، يمثل حاصل ضرب AV_1 وFOR_2 احتمالية أن تكون الوحدة 1 متاحة (قيد التشغيل) والوحدة الثانية غير متاحة (خارج الخدمة) في الوقت نفسه. لتقييم وثوقية توليد الطاقة في النظام (بما في ذلك توسيع النظام وتخطيطه و/ أو ربط الأنظمة ببعضها)، يلزم نموذجان، وهما: نموذج السعة ونموذج الحمل؛ وسيتم توضيحهما وتفصيلهما في الفقرتين التاليين.

6-4-3 جداول احتمالية انقطاع السعة (نموذج السعة Capacity Model)

يُعرف نموذج التوليد المطلوب في طريقة فقدان الحمل أحيانًا باسم "جدول احتمالية انقطاع السعة" أو نموذج التوليد "Generating Model". وكما يوحي الاسم، فهو عبارة عن مصفوفة بسيطة من مستويات

السعة واحتمالات وجودها المرتبطة بها. فإذا كانت جميع الوحدات في النظام متطابقة، فيمكن الحصول على جدول احتمالية انقطاع السعة بسهولة باستخدام التوزيع ذي الحدين .

مع ذلك، من المستبعد للغاية أن تكون جميع الوحدات في نظام عملي متطابقة، ولذلك فإن تطبيق التوزيع ذي الحدين محدود. يمكن دمج الوحدات باستخدام مفاهيم الاحتمالات الأساسية، ويمكن توسيع هذا النهج إلى تقنية تكرارية بسيطة لكنها فعالة، حيث تُضاف الوحدات بالتتابع لإنتاج النموذج النهائي. ويمكن توضيح هذه المفاهيم بمثال عددي بسيط.

مثال6-1 :

أنشئ جدول احتمالية انقطاع السعة للنظام التالي:

يتكون النظام من: وحدتين بقدرة 3 ميجاواط لكل منهما، احتمال انقطاع السعة القسري لكل منهما 0.02

وحدة واحدة بقدرة 5 ميجاواط، احتمال انقطاع السعة القسري لكل منها 0.02.

الحل :

لنفترض أولًا وجود وحدتين بقدرة 2 × 3 ميغاواط قيد التشغيل ووحدة بقدرة 5 ميغاواط خارج الخدمة:

يمكن دمج الوحدتين الأوليتين المتطابقتين للحصول على جدول احتمالية انقطاع السعة الموضح في الجدول 6-1 باستخدام توزيع ذي الحدين .

بما أن $q = FOR = 0.02$ ، فان $P = 1 - q = 1 - 0.02 = 0.98$.

الجدول 6-1 جدول احتمالية انقطاع السعة للوحدتين 3 MW .

السعة خارج الخدمة Capacity out of service	الإحتمالية Probability
0 MW	p_1p_2 = (0.98) (0.98) = 0.9604
3MW	$p_1q_2+p_2q_1$= (0.98) (0.02) + (0.98) (0.02= 0.0392
6MW	q_1q_2= (0.02) (0.02) = 0.0004
	1.0000

الآن ، يمكن إضافة وحدة التوليد الثالثة بقدرة 5 ميغاواط إلى هذا الجدول بافتراض أنها قد تكون في حالتين: إما أن تكون قيد التشغيل باحتمالية (1 - 0.02) = 0.98، أو خارج الخدمة باحتمالية 0.02. وبالتالي، فإن الجدولين الناتجين (الجدولان 6-2 و6-3) يعتمدان على الحالات المفترضة للوحدة. ويمكن تطبيق هذا النهج على أي عدد من حالات الوحدات.

1. للوحدة 5 ميجاواط قيد التشغيل ($p3 = 0.98$ ،$q3 = 0.02$)

الجدول 6-2 السعة 5 MW في الخدمة

السعة خارج الخدمة Capacity out of service	الإحتمالية Probability
0+0 MW	(0.9604) (0.98) =0.941192
3+0MW	(0.0392) (0.98) = 0.038416
6+0 MW	(0.0004) (0.98) =0.000392
	0.98000

2. الوحدة بقدرة 5 ميجاواط خارج الخدمة

الجدول 6-3 السعة 5 MW خارج الخدمة

السعة خارج الخدمة Capacity out of service	الإحتمالية Probability
0+5=5 MW	(0.9604) (0.02) =0.019208
3+5=8MW	(0.0392) (0.02) = 0.000784
6+5=11 MW	(0.0004) (0.02) =0.000008
	0.020000

يمكن الآن دمج الجدولين وإعادة ترتيبهما (الجدول6-4) حيث تمثل قيمة الاحتمالية في الجدول احتمال خروج مقدار السعة المحدد من الخدمة. ويمكن إضافة عمود آخر يمثل الاحتمالية التراكمية، وهي احتمالية

وجود كمية من السعة في حالة انقطاع تساوي أو تزيد عن الكمية المحددة. وتتناقص قيم الاحتمالية التراكمية مع زيادة السعة في حالة الانقطاع.

الجدول6-4 : جدول احتمالية انقطاع السعة لنظام الوحدات الثلاث.

السعة خارج الخدمة Capacity out of service	الإحتمالية الفردية Individual Probability	الإحتمالية التراكمية Cumulative Probability
0 MW	0.941192	1.000000
3 MW	0.038416	0.058808
5 MW	0.019208	0.020392
6 MW	0.000392	0.001184
8MW	0.000784	0.000792
11MW	0.000008	0.000008
	1.000000	

على الرغم من أن هذا لا ينطبق تمامًا على كل جدول احتمالية على حدة، إلا أن الاتجاه العام نفسه يُتبع. فعلى سبيل المثال، في الجدول أعلاه، تكون احتمالية فقدان 8 ميغاواط أعلى من احتمالية فقدان 6 ميغاواط. في كلتا الحالتين، ولا يوجد سوى وحدتين. ويعود هذا الاختلاف إلى أنه في حالة 8 ميغاواط، يمكن أن تحدث مساهمة فقدان 3 ميغاواط بطريقتين. في نظام عملي، وتكون احتمالية خروج كمية كبيرة من السعة من الخدمة عادةً ضئيلة جدًا. بما أن هذا الشرط يتطلب انقطاع الخدمة عن عدة وحدات، فإن جدول احتمالية انقطاع الخدمة الخاص بالسعة يتضمن نظريًا سعة النظام بأكملها. ويمكن اختصار الجدول بحذف جميع حالات انقطاع الخدمة التي يكون احتمالها التراكمي أقل من قيمة محددة، مثل 10^{-8} ويؤدي هذا أيضًا إلى توفير كبير في وقت المعالجة الحاسوبية، حيث يتم اختصار الجدول تدريجيًا مع كل وحدة تُضاف. ويمكن جمع احتمالات انقطاع الخدمة مع إضافة الوحدات، أو حسابها مباشرةً كقيم تراكمية، وبالتالي لا ينتج عن عملية الاختصار أي خطأ. ويتوضح ذلك في الفقرة 6- 5 التي تعطي مثالاً لنظام عملي يحتوي على عدد كبير من الوحدات ذات السعات المختلفة، الذي سيحتوي الجدول على عدة مئات من مستويات انقطاع الخدمة المنفصلة المحتملة. ويمكن تقليل هذا العدد بتجميع الوحدات في مجموعات سعة متطابقة قبل دمجها، أو بتقريب الجدول إلى مستويات منفصلة بعد الدمج. يؤدي تجميع الوحدات قبل إنشاء الجدول إلى إدخال تقريبات غير ضرورية يمكن تجنبها باستخدام أسلوب تقريب الجدول. وتعتمد قيمة زيادة التقريب المستخدمة

على الدقة المطلوبة. يحتوي الجدول النهائي المُقرّب على قيم انقطاع السعة التي تُساوي مضاعفات قيمة التقريب. ويتناقص عدد مستويات السعة مع زيادة قيمة التقريب، مما يُؤدي إلى انخفاض مُقابل في الدقة.

6-4-4 نموذج الحمل Load Model

في دراسات الوثوقية، يعتمد إنتاج الطاقة على تغيرات الحمل على وحدات التوليد خلال العام. لذا، ينبغي تطوير نموذج دقيق للحمل الزمني لتسهيل تحليل الوثوقية. ويُعرف نموذج الحمل باسم "منحنى مدة الحمل (LDC) Load demand curve، وهو الأنسب للاستخدام بدلاً من منحنى تغير الحمل التقليدي. هناك بعض الحقائق المتعلقة بمنحنى مدة الحمل والتي يجب مراعاتها، ويمكن تلخيصها كما يلي:

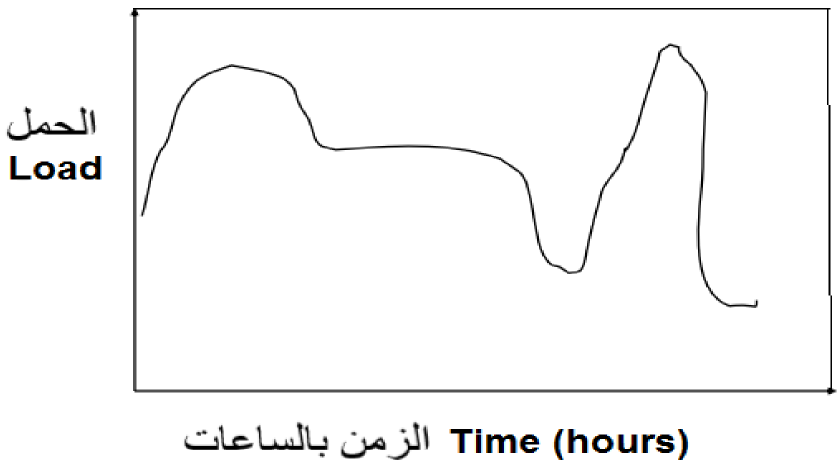
أ. منحنى مدة الحمل هو ترتيب لجميع مستويات الحمل بترتيب تنازلي من حيث المقدار.

ب. تمثل المساحة أسفل منحنى مدة الحمل والطاقة المطلوبة من النظام (المستهلكة).

ج. يمكن استخدام منحنى مدة الحمل في التوزيع الاقتصادي، وتقييم الوثوقية، وتخطيط وتشغيل نظام الطاقة.

د. يُعد التعامل معه أسهل من التعامل مع منحنى تغير الحمل الزمني التقليدي.

ويوضح الشكل6-6 المناقشة السابقة المتعلقة بمنحنى مدة الحمل مع جميع التعليقات التوضيحية ذات الصلة.



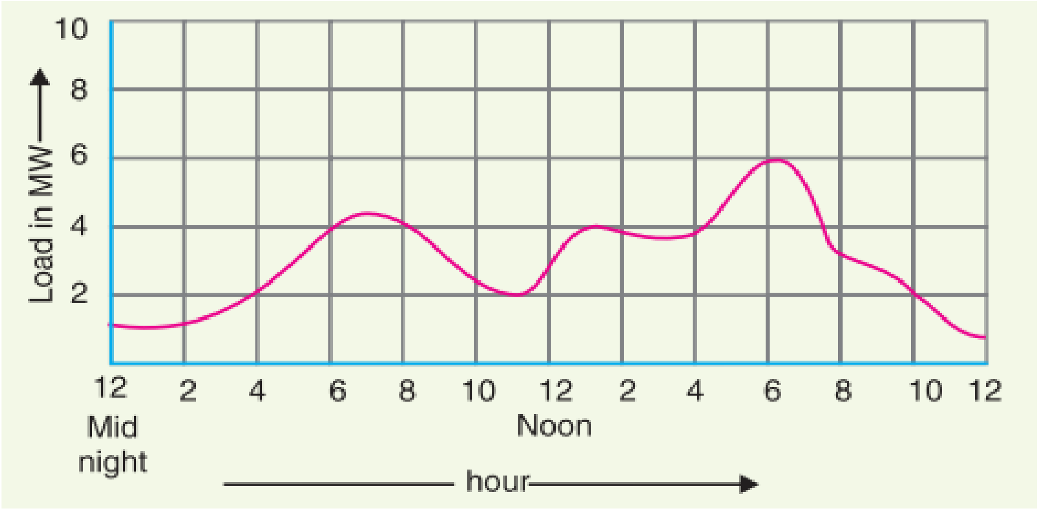
الشكل 6-6 : منحنى مدة الحمل التقليدي.

- **أنواع منحنيات الحمل**

تعريف: هو المنحنى الذي يوضح تغير الحمل على محطة توليد الطاقة مع مرور الوقت.حيث يتغير حمل النظام باستمرار مع مرور الوقت، حيث تحدث تغيرات كبيرة من ساعة إلى أخرى، ومن يوم إلى آخر، ومن شهر إلى آخر، ومن سنة إلى أخرى. وقد يُمثل هذا المنحنى ذروة الأحمال اليومية على مدار

عام، أو ذروة الأحمال في يوم واحد، أو أي فترة زمنية مناسبة أخرى، مثل ذروة فصل الصيف في دول الشرق الأوسط، والتي قد تمتد لثلاثة أشهر. وبالمثل، قد يشمل المنحنى جميع أيام تلك الفترة أو لا، فعلى سبيل المثال، يمكن إهمال أيام العطلات الأسبوعية نظرًا لقلة احتمالية انقطاع الحمل خلالها. ويكون بالأشكال التالية :

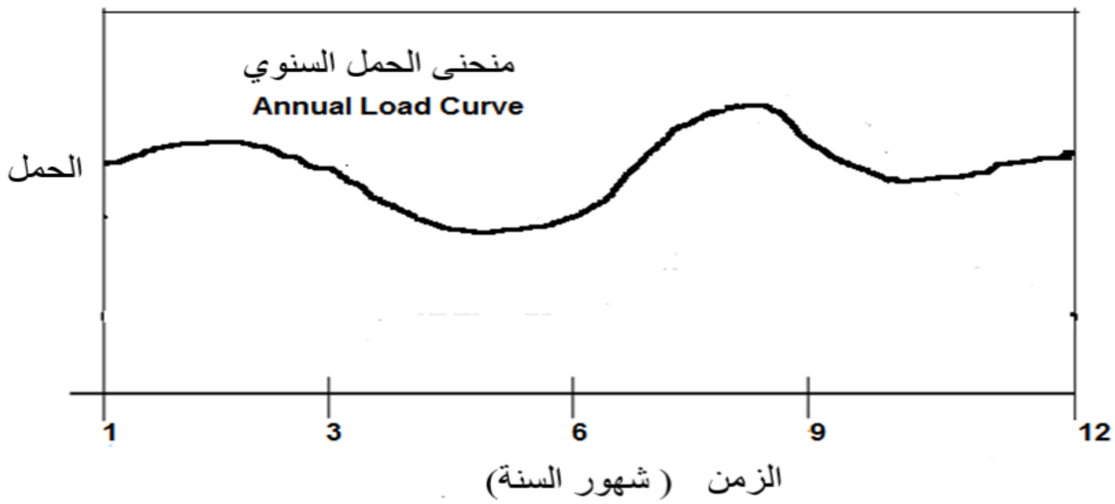
• منحنى الحمل اليومي – تغيرات الحمل خلال اليوم بأكمله، (انظر الشكل6-7)



الشكل6-7: منحنى الحمل اليومي النظري.

• منحنى الحمل الشهري – منحنى الحمل المستخلص من منحنى الحمل اليومي

• منحنى الحمل السنوي – منحنى الحمل المستخلص من منحنى الحمل الشهري (انظر الشكل6-8). يُعد هذا المنحنى التمثيل الأكثر دقة، لكن البيانات المطلوبة كبيرة جدًا.

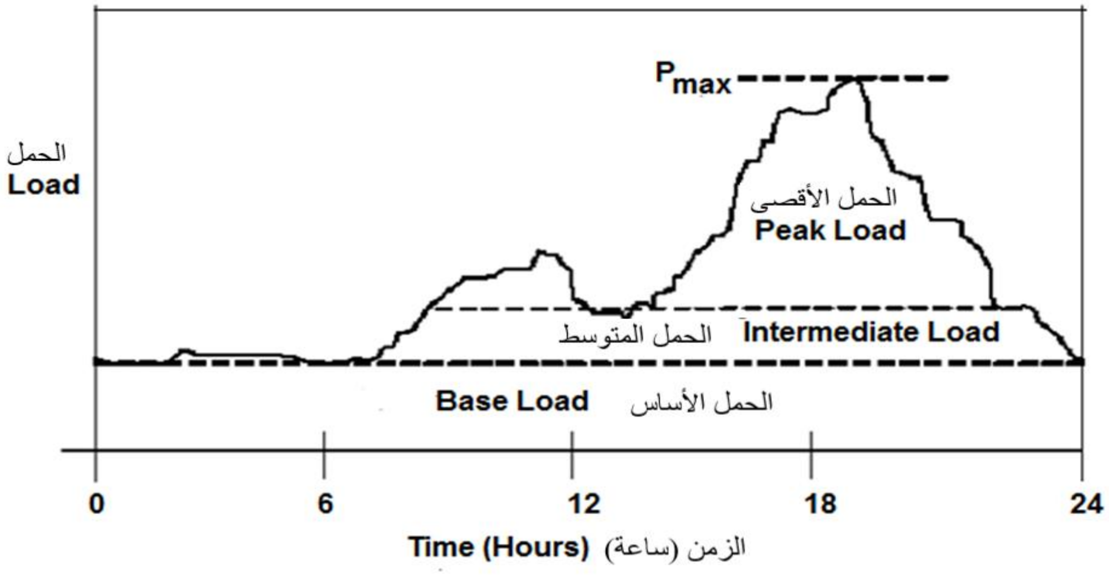


الشكل 6-8 منحنى الحمل السنوي.

الحمل الأساسي وحمل الذروة في محطة توليد الطاقة

• الحمل الأساسي: الحمل الثابت الذي يستمر طوال اليوم تقريبًا في المحطة (انظر الشكل9-6)

• حمل الذروة: أحمال الذروة المختلفة في المحطة



الشكل 6-9 الحمل الأساسي وحمل الذروة في محطة توليد الطاقة.

- **خصائص الأحمال في محطة توليد الطاقة**

تعاريف مهمة :

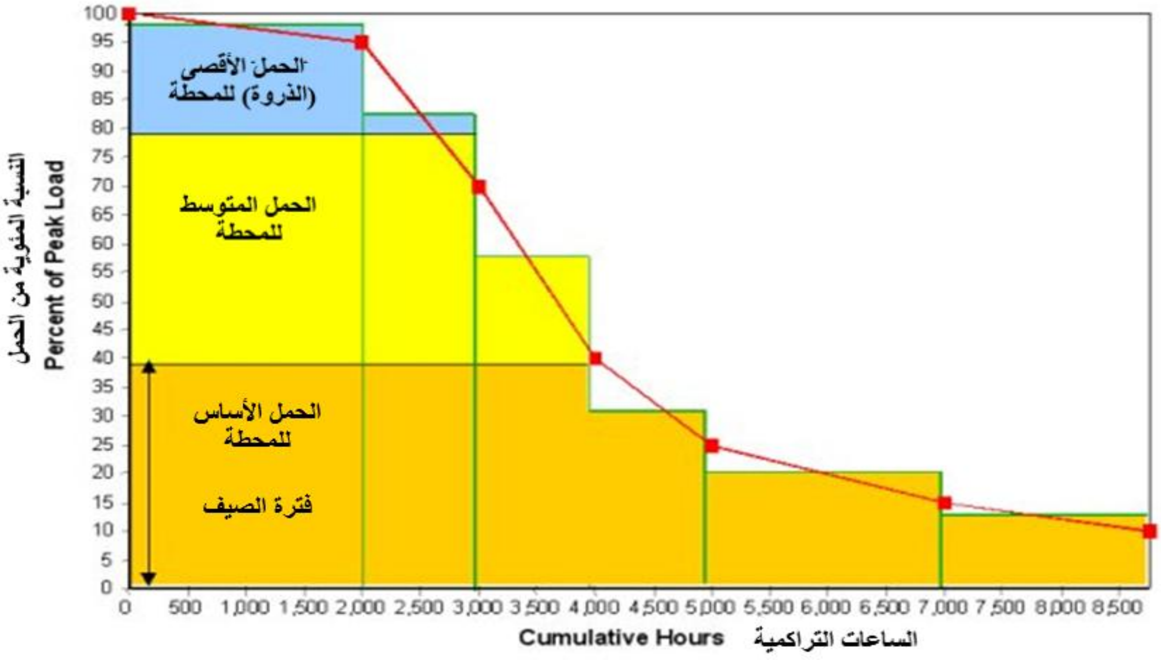
- سعة المحطة: هي مجموع سعات جميع وحدات التوليد، وتُسمى أيضًا السعة المركبة.
- الحمل المتصل: هو مجموع القدرة التشغيلية المستمرة لجميع المعدات المتصلة بشبكة التغذية.
- الطلب الأقصى: هو أعلى مستوى للحمل على محطة توليد الطاقة خلال فترة زمنية محددة.
- عامل الطلب: هو نسبة الطلب الأقصى على محطة توليد الطاقة إلى الحمل المتصل بها.

  = (الطلب الأقصى) ÷ (الحمل المتصل)
- متوسط الحمل: هو متوسط الأحمال التي تتعرض لها محطة توليد الطاقة خلال فترة زمنية محددة (يوم أو شهر أو سنة).
- متوسط الحمل اليومي = (كيلوواط ساعة مُولّدة في اليوم) / (24 ساعة)
- متوسط الحمل الشهري = (كيلوواط ساعة مُولّدة في الشهر) / (عدد ساعات الشهر)
- عامل الحمل: هو نسبة متوسط الحمل إلى أقصى طلب خلال فترة زمنية محددة.

  = (متوسط الحمل) ÷ (أقصى طلب)

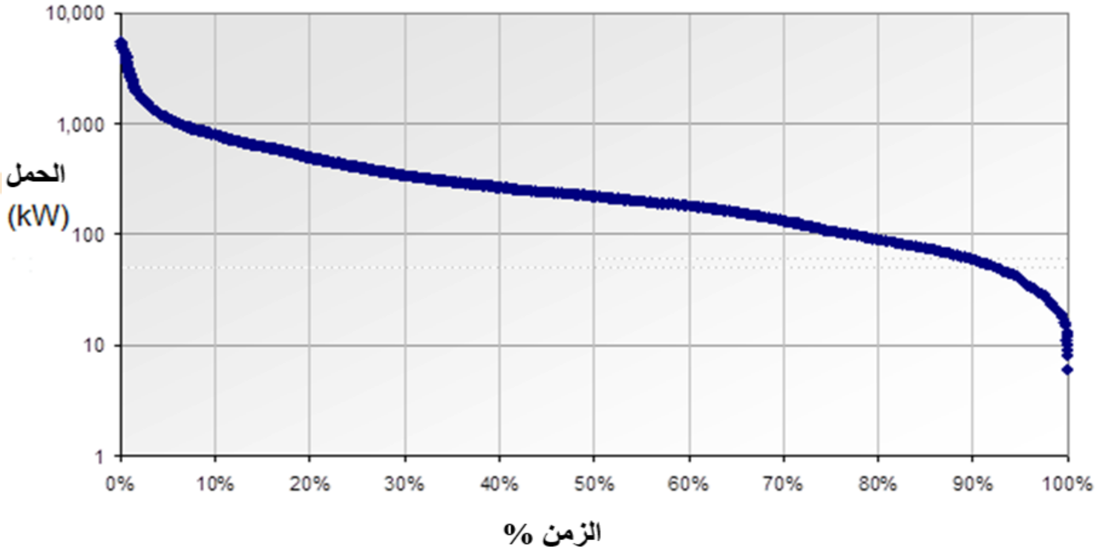
- معامل التنوع: هو نسبة مجموع أقصى طلبات الطاقة الفردية إلى أقصى طلب على محطة توليد الطاقة.
- عامل قدرة المحطة: هو نسبة الطاقة المنتجة فعليًا إلى أقصى طاقة ممكنة كان من الممكن إنتاجها خلال فترة زمنية محددة.
- عامل قدرة المحطة (CF) = (متوسط الحمل) ÷ (قدرة المحطة)
- متوسط الحمل السنوي = (كيلوواط ساعة مُولّدة في اليوم) ÷ (8760 ساعة)

بالنسبة لشكل وترتيب منحنى مدة الحمل (LDC): فكما ذكر سلفاً أن منحنى مدة الحمل هو تمثيل لتكرار حدوث ذروة الأحمال خلال فترة زمنية محددة، مرتبة تنازليًا. وعندما يتم ترتيب عناصر منحنى الحمل بترتيب تنازلي حسب مقدارها، فيكون كما هو موضح في الشكل 6-10 الذي يظهر منحنى مدة الحمل التراكمي لمحطة توليد.



الشكل6-10: منحنى مدة الحمل التراكمي مع محور الزمن الفعلي.

أو قد يعطى شكل منحنى مدة الحمل بصورة أوضح كما في الشكل 6-11التالي :



الشكل 6-11 منحنى مدة الحمل التراكمي مع محور نسبة الزمن النهائي.

6-5 طرق تقييم وثوقية نظام التوليد

6-5-1 الطريقة الاحتمالية : طريقة احتمالية فقدان الحمل (LOLE)

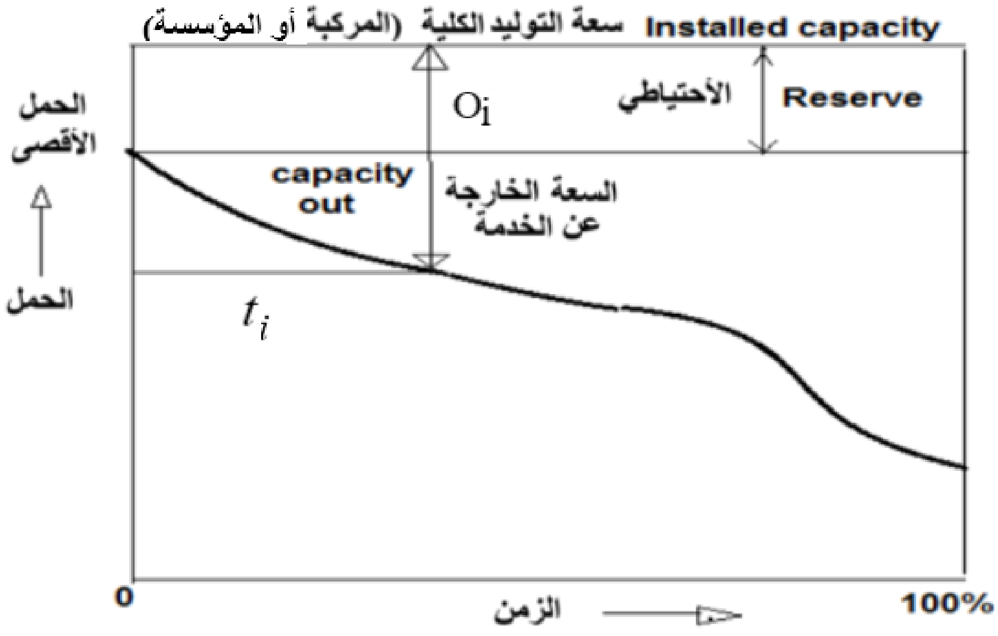
The probabilistic approach

في السابق، كانت تُستخدم جداول احتمالية انقطاع السعة لتقييم المخاطر الاحتمالية بافتراض مستوى حمل ثابت. ولكن في الواقع، تتغير الأحمال، ولذلك يلزم وجود ومعرفة نموذج للحمل بالإضافة إلى نموذج للتوليد. وتُعد طريقة احتمالية فقدان الحمل على الأرجح الطريقة الأكثر قبولًا واستخدامًا من بين جميع الطرق لتقييم مستوى المخاطر في أنظمة التوليد. نموذج الحمل المستخدم في هذه الطريقة هو خاصية الحمل الموضحة في الشكل 6-12 التالي.

تُعرف خاصية الحمل هذه بمنحنى مدة الحمل (LDC)، الذي سبق شرحه في الفقرة 6-4 السابقة . وهو رسم بياني يوضح الحمل كدالة لعدد الوحدات الزمنية التي تجاوز فيها الحمل القيمة المحددة.

لتبسيط الأمثلة التالية، سنعتبر منحنى الحمل عبارة عن رسم بياني لذروة الحمل اليومي على مدار عام، وبالتالي يمثل المحور الأفقي 365 يومًا.

يتضح من منحنى الحمل أن انقطاعًا في السعة أقل من الاحتياطي لن يتسبب في فقدان الحمل. لنفترض الآن ما يلي:



الشكل 6-12 نموذج الحمل المستخدم في طريقة احتمالية فقدان الحمل.

Oi – الانقطاع رقم i في جدول احتمالية انقطاع النظام.

Pi – احتمالية حدوث هذا الانقطاع رقم i.

ti – عدد الوحدات الزمنية التي يتسبب فيها هذا الانقطاع في فقدان الحمل.

وبالتالي، فإن مساهمة انقطاع التيار الكهربائي في فقدان الحمل في النظام Oi هي $P_i\ t_i$ وحدة زمنية. وعليه، فإن إجمالي فقدان الحمل المتوقع ELOL- Expected Loss of Load للفترة الزمنية قيد الدراسة هو:

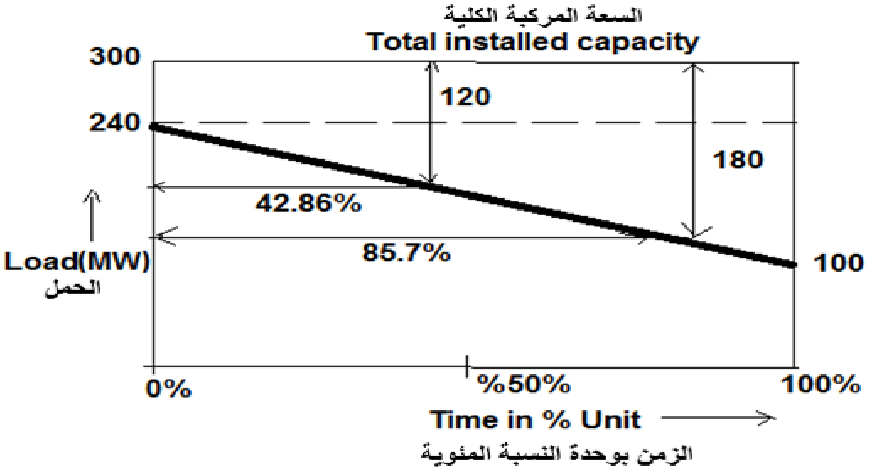
$$ELOL = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{P_i}\ t_i \qquad \text{وحدات زمن} \qquad (6.2)$$

وبناءً على ذلك، إذا اعتبرنا أن خاصية الحمل هي التغير اليومي في ذروة الحمل على مدار عام، فإن الوحدات تمثل الفقد المتوقع للحمل بالأيام في السنة.

ويمكن توضيح هذه المبادئ في المثال التالي :

مثال 6-2 :

لنفترض نظامًا يتكون من 5 وحدات، كل منها بقدرة 60 ميجاواط، ومعامل أداء (FOR) يساوي 0.03. ولتبسيط الأمر، نفترض أن خاصية الحمل خطية، حيث تبلغ ذروة الحمل 240 ميجاواط، وأدنى حمل 100 ميجاواط، كما هو موضح في الشكل6-13.



الشكل 6-13 خاصية الحمل الخطية .

وبالتالي، فإن جدول احتمالية انقطاع الطاقة بخروج سعات التوليد (نموذج التوليد) وفقدان الحمل المتوقع هو الجدول 6-5 .

الجدول 6-5.

السعة الخارجة عن الخدمة Capacity out (MW)	الإحتمالية الفردية Individual probability (P_i)	الزمن Time t_i %	فقدان الحمل المتوقع Expected Load loss [$P_i * t_i$]
0	0.858734	0	-----
60	0.132794	0	-----
120	0.008214	42.86	0.352052
180	0.000254	85.71	0.021770
240	0.000004	100.00	0.000400
	1.000000		$\sum P_i t_i = 0.374222\%$

الخسارة المتوقعة في الحمل إذا كانت 100% = 365 يومًا هي:

$$E(t) = 0.374222 \times (365 / 100) = 1.365910$$ يومًا/سنة

تُعتبر هذه القيمة مفرطة. أما القيمة المعقولة فهي 0.1 يومًا / سنة.

• تأثير تغيير معدل انقطاع التيار القسري

سندرس الآن تأثير تغيير قيمة FOR على فقدان الحمل، وذلك بالنظر إلى النظام نفسه ولكن مع قيمة FOR تساوي 0.01 لكل وحدة. وبالتالي، فإن الجدول يكون كما معطى في الجدول 6-6 التالي.

الجدول 6-6 .

السعة الخارجة عن الخدمة Capacity out (MW)	الإحتمالية الفردية Individual probability (P_i)	الزمن Time t_i %	فقدان الحمل المتوقع Expected Load loss [$P_i * t_i$]
0	0.950990	0	-----
60	0.048030	0	-----
120	0.000970	42.86	0.041574
180	0.000010	85.71	0.000857
240	0.000000	100.00	0.000000
	1.000000		$\sum P_i t_i = 0.042431\%$

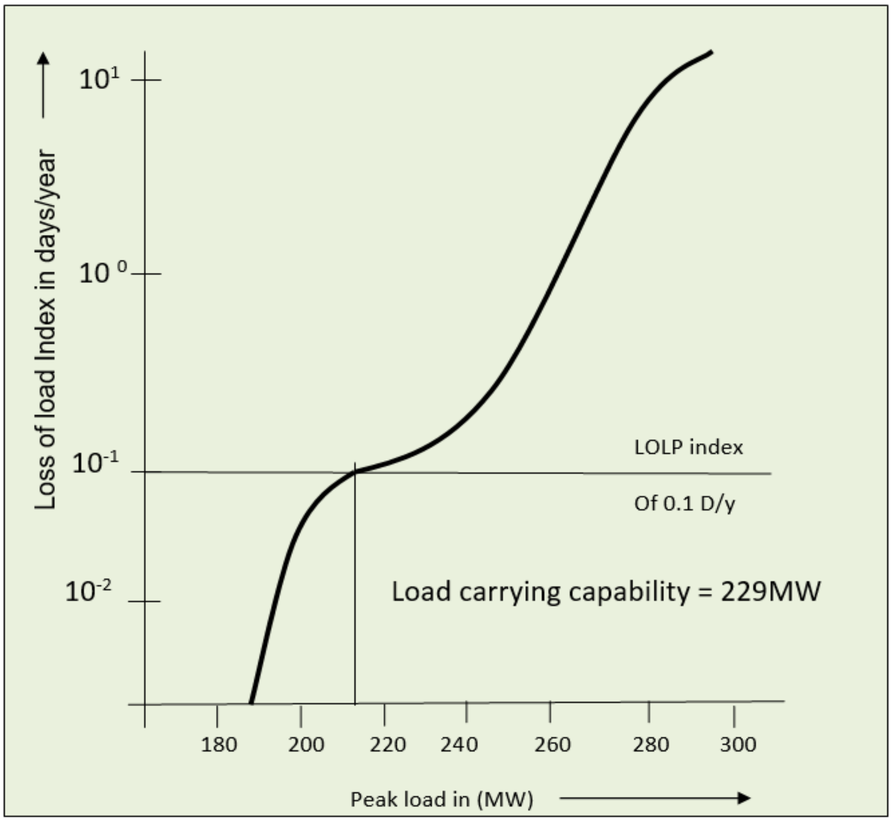
• **تأثير تغيرات ذروة الحمل**

إذا تم تحليل نظام التوليد نفسه من حيث قدرته على تغذية حمل له نفس معامل الحمل المستخدم سابقًا ولكن بأحمال ذروة تتراوح بين 120 ميجاوات و300 ميجاوات، فسيتم الحصول على الخسائر المتوقعة التالية في الأحمال.

الجدول 6-7.

الحمل الأقصى (MW)	فقدان الحمل يوم / سنة	الحمل الأقصى (MW)	فقدان الحمل يوم / سنة
300	7.820810	200	0.052679
280	5.265140	180	0.001564
260	2.712127	160	0.001043
240	0.154874	140	0.000522
220	0.103754	120	0.000000

إذا اعتُبر مستوى الخطر البالغ 0.1 يوم / سنة مقبولاً، فإن نظام التوليد المذكور أعلاه قادر على توفير حمل ذي خصائص محددة، وبحمل ذروة يبلغ 220 ميغاواط. يُعرف هذا بقدرة تحمل الحمل لنظام التوليد. ويوضح الشكل 6- 14 رسمًا بيانيًا للجدول السابق يُبين فقدان الحمل بالأيام/السنة كدالة لحمل الذروة.



الشكل 6- 14 رسم بياني للجدول 6-7 يُبين فقدان الحمل بالأيام/السنة كدالة لحمل الذروة.

6-5-2 الطريقة الحتمية (غير الإحتمالية)

The deterministic (non- probabilistic) method

لتوضيح تطبيق الطريقة الحتمية، لنفترض أنظمة التوليد الأربعة التالية:

النظام 1 - 24 وحدة × 10 ميجاواط، معدل انقطاعها القسري 0.01

النظام 2 - 12 وحدة × 20 ميجاواط، معدل انقطاعها القسري 0.01

النظام 3 - 12 وحدة × 20 ميجاواط، معدل انقطاعها القسري 0.03

النظام 4 - 22 وحدة × 10 ميجاواط، معدل انقطاعها القسري 0.01

في كل نظام من هذه الأنظمة، تكون الوحدات متطابقة، وبالتالي، يمكن استخدام التوزيع ذي الحدين لتقييم جداول احتمالية انقطاع السعة.

من التوزيع ذي الحدين، تُعطى احتمالية انقطاع سعة معينة قسرًا أو عدم توفرها بالمعادلة التالية:

$$P_r = P[X = r, n, q] = \frac{n!}{r!\,(n-r)!} q^r \, p^{n-r} \qquad (6.3)$$

حيث:

n= عدد الوحدات

r= عدد الوحدات المتوقفة قسراً (غير متاحة)

p= التوافرية (احتمالية وجودها قيد التشغيل)

q= عدم التوافر (معدل التوقف القسري FOR)

على سبيل المثال، في النظام -1، احتمالية توقف 30 ميغاواط عن العمل هي:

$$P[X = 3,24,0.01] = \frac{24!}{3!\,(24-3)!} 0.01^3 (1-0.01)^{24-3} = 0.001639$$

باستخدام هذه التقنية لجميع الأنظمة، يمكن تقييم جداول احتمالية الانقطاع التالية مع اقتطاع الجدول إلى 10^{-6}.

تتشابه الأنظمة الأربعة تشابهًا كبيرًا، ولكنها ليست متطابقة. في كل نظام، تكون الوحدات متطابقة، وبالتالي يمكن بسهولة إنشاء جدول احتمالية انقطاع السعة باستخدام التوزيع ذي الحدين. هذه المصفوفات موضحة في الجدول 6-8 .

تم تقليص هذه الجداول إلى احتمال تراكمي قدره 10^{-6} درجات. يُلاحظ أنه تم حذف عدد كبير من حالات انقطاع السعة باستخدام تقنية التقليص هذه. يُفترض أن مستوى الحمل أو الطلب على النظام ثابت. إذا عُرّف الخطر في النظام بأنه احتمال عدم تلبية الحمل، فإن الخطر الحقيقي في النظام يُعطى بقيمة الاحتمال التراكمي المقابل لحالة الانقطاع التي تقل بمقدار زيادة واحدة عن تلك التي تلبي الحمل على النظام. يمكن الآن مقارنة معياري الخطر الحتميين بهذا الخطر الاحتمالي كما هو موضح في القسمين (أ) و(ب) التاليين.

(أ) هامش الاحتياطي المئوي

بافتراض أن الطلب المتوقع على الطاقة في الأنظمة 1 و2 و3 و4 هو 200 و200 و200 و183 ميغاواط على التوالي . والسعة المركبة في جميع الحالات الأربع تسمح بهامش احتياطي قدره 20%، أي ثابت لجميع الأنظمة الأربعة. يمكن إيجاد المخاطر الاحتمالية أو الحقيقية في كل نظام من الأنظمة الأربعة من الجدول 6-8 ، وهي كالتالي:

الجدول6-8 : جداول احتمالية انقطاع السعة للأنظمة من 1 إلى 4.

Probability الإحتمالية		النظام 1 السعة (MW)	
التراكمية	الفردية	في الخدمة	خارج الخدمة
1.000000	0.785678	240	0
0.214322	0.190467	230	10
0.023855	0.022125	220	20
0.001730	0.001639	210	30
0,000091	0.000087	200	40
0.000004	0.000004	190	50

Probability الإحتمالية		النظام 2 السعة (MW)	
التراكمية	الفردية	في الخدمة	خارج الخدمة
1.000000	0.886384	240	0
0.113616	0.107441	220	20
0.006175	0.005969	200	40
0.000206	0.000201	180	60
0.000005	0.000005	160	80

Probability الإحتمالية		النظام 3 السعة (MW)	
التراكمية	الفردية	في الخدمة	خارج الخدمة
1.000000	0.693841	240	0
0.306159	0.257509	220	20
0.048650	0.043803	200	40
0.004847	0.004516	180	60
0.000331	0.000314	160	80
0.000017	0.000016	140	100
0.000001	0.000001	120	120

Probability الإحتمالية		النظام 4 السعة (MW)	
التراكمية	الفردية	في الخدمة	خارج الخدمة
1.000000	0.801631	220	0
0.198369	0.178140	210	10
0.020229	0.018894	200	20
0.001335	0.001272	190	30
0.000063	0.000061	180	40
0.000002	0.000002	170	50

المخاطر في النظام 1 = 0.000004

المخاطر في النظام 2 = 0.000206

المخاطر في النظام 3 = 0.004847

المخاطر في النظام 4 = 0.000063

تُظهر قيم المخاطر هذه أن المخاطر الحقيقية في النظام 3 أكبر بألف مرة من تلك الموجودة في النظام 1. وسيُبين تحليلٌ مُفصّل للأنظمة الأربعة أن التغير في المخاطر الحقيقية يعتمد على معدل الانقطاع القسري، وعدد الوحدات، والطلب على الأحمال.

لا يُمكن لطريقة النسبة المئوية للاحتياطي أن تأخذ هذه العوامل في الحسبان، وبالتالي، على الرغم من استخدامها لمعيار مخاطر "ثابت"، فإنها لا تُعطي تقييمًا مُتسقًا للمخاطر للنظام.

(ب) احتياطي أكبر وحدة

لنفترض الآن أن الطلب المتوقع على الأحمال في الأنظمة 1 و2 و3 و4 هو 230 و220 و220 و210 ميغاواط على التوالي. السعة المركبة في جميع الحالات الأربع بحيث يكون الاحتياطي مساويًا لأكبر وحدة، وهي قيمة ثابتة لجميع الأنظمة. في هذه الحالة، تكون المخاطر الاحتمالية كما يلي:

المخاطر في النظام 1 = 0.023855

المخاطر في النظام 2 = 0.006175

المخاطر في النظام 3 = 0.048650

المخاطر في النظام 4 = 0.020229

يكون التباين في المخاطر أقل بكثير في هذه الحالة، مما يُضفي بعض المصداقية على المعيار. تبلغ النسبة بين أدنى وأعلى مستويات المخاطر الآن 8:1 وتغير ترتيب استحقاق المخاطر من النظام 3-2-4-1 في حالة النسبة المئوية للاحتياطي إلى 3-1-4-2 في حالة معيار "أكبر وحدة".

يتضح من هذه المقارنات أن استخدام المعايير القطعية أو التقريبية قد يؤدي إلى مخاطر احتمالية متباينة للغاية حتى بالنسبة للأنظمة المتشابهة جدًا. ولذلك، فهي أساليب غير متسقة وغير موثوقة وذاتية لتخطيط هامش الاحتياطي.

6-6 مؤشرات فقدان الحمل

6-6-1 المفاهيم وتقنيات التقييم

يمكن دمج نموذج نظام التوليد الموضح في الفقرة السابقة مع نموذج حمل مناسب لإنتاج مؤشر مخاطر النظام. ويوجد عدد من نماذج الحمل الممكنة التي يمكن استخدامها، وبالتالي يوجد عدد من مؤشرات المخاطر التي يمكن إنتاجها. وأبسط نموذج حمل، وهو الأكثر استخدامًا، هو النموذج الذي يُمثل فيه كل يوم بحمل الذروة اليومي حيث يمكن ترتيب أحمال الذروة اليومية الفردية تنازليًا لتشكيل نموذج حمل تراكمي يُعرف بمنحنى تغير حمل الذروة اليومي. ويُعرف النموذج الناتج بمنحنى مدة الحمل عند استخدام قيم الحمل الساعية الفردية، وفي هذه الحالة تمثل المساحة أسفل المنحنى الطاقة المطلوبة في الفترة الزمنية المحددة. وهذا لا ينطبق على منحنى تغير ذروة الحمل اليومي.

في هذا النهج، يتم دمج جدول احتمالية انقطاع سعة النظام المطبق مع خصائص حمل النظام لإعطاء تقدير لمخاطر فقدان الحمل. تكون الوحدات بالأيام إذا تم استخدام منحنى تغير ذروة الحمل اليومي، وبالساعات إذا تم استخدام منحنى مدة الحمل. قبل دمج جدول احتمالية الانقطاع، يجب إدراك وجود فرق بين مصطلحي "انقطاع السعة" و "فقدان الحمل". يشير مصطلح "انقطاع السعة" إلى فقدان في التوليد، والذي قد يؤدي أو لا يؤدي إلى فقدان الحمل. يعتمد هذا الشرط على هامش احتياطي سعة التوليد ومستوى حمل النظام. يحدث "فقدان الحمل" فقط عندما يتجاوز مستوى حمل النظام قدرة سعة التوليد المتبقية في الخدمة.

يمكن استخدام أحمال الذروة اليومية الفردية بالتزامن مع جدول احتمالية انقطاع التيار الكهربائي للحصول على عدد الأيام المتوقع خلال الفترة المحددة التي يتجاوز فيها حمل الذروة اليومي السعة المتاحة. ويُشار إلى هذا المؤشر في هذه الحالة باسم "مؤشر فقدان الحمل المتوقع" Loss Of Load (LOLE) Expected. ويسمى في بعض المراجع إحتمالية فقدان الحمل LOLP .

$$LOLE = \sum_{i=1}^{n} P_i(C_i - L_i) \qquad \text{أيام / بالفترة} \qquad (6.4)$$

حيث Ci = السعة المتاحة في اليوم

Li = ذروة الحمل المتوقعة في اليوم.

Pi (Ci - Li) = احتمال انقطاع الحمل في اليوم ، تُستخرج هذه القيمة مباشرةً من جدول احتمالية انقطاع السعة التراكمية.

باستخدام النظام البسيط الموضح في الجدول 6-9. كل وحدة في هذا الجدول لها نسبة توافر تبلغ 0.98 ونسبة عدم توافر تبلغ 0.02 (المعادلة6.1) يوضح الجدول 6-9 هذا الإجراء باستخدام نظام بقدرة 100 ميغاواط. ويُبين الجدول 6-10 بيانات الأحمال لفترة 365 يومًا.

الجدول 6-9.بيانات النظام.

رقم وحدة التوليد Unit no.	السعة Capacity (MW)	معدل الفشل (فشل / اليوم) Failure rate (f./ day)	معدل الإصلاح (إصلاح/اليوم) Repair rate (r / day)
1	25	0.01	0.49
2	25	0.01	0.49
3	50	0.01	0.49

باستخدام المعادلة (6.4).

LOLE = 2P (100 - 57) + 83/>(100 - 52) + !07P(100 - 46) + 116f(100 - 41) + 47.P(100 - 34) = 12(0.020392) + 83(0.020392) + 107(0.000792) + 116(0.000792) + 47(0.000792)

2.15108 = يوم/سنة.

$$
\begin{aligned}
\text{LOLE} &= 12P(100-57) + 83P(100-52) + 107P(100-46) \\
&\quad + 116P(100-41) + 47P(100-34) \\
&= 12(0.020392) + 83(0.020392) + 107(0.000792) \\
&\quad + 116(0.000792) + 47(0.000792) \\
&= \underline{2.15108 \text{ days/year.}}
\end{aligned}
$$

الجدول 6-10 بيانات التحميل المستخدمة لتقييم LOLE.

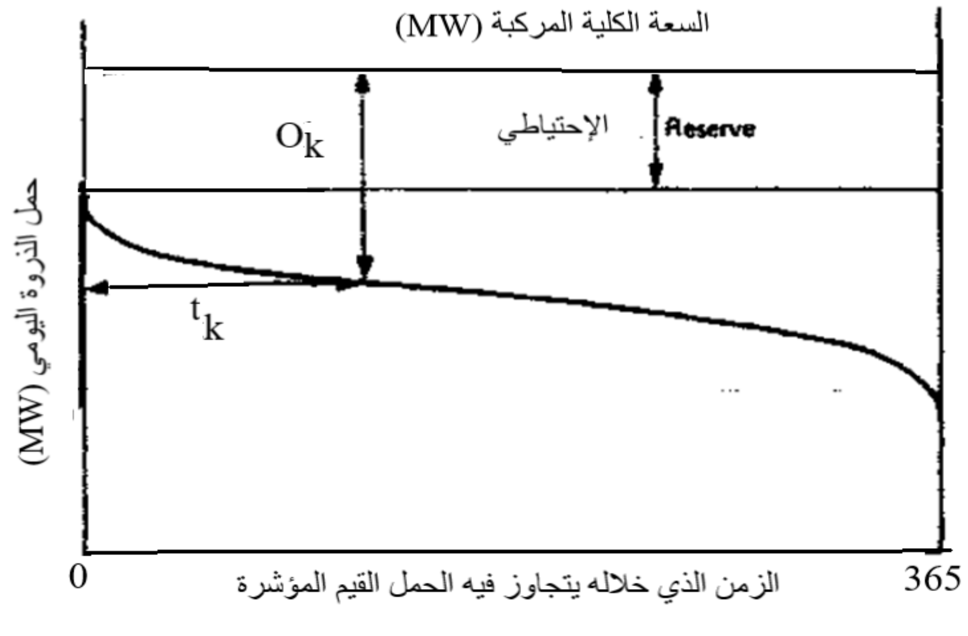
حمل الذرة اليومي (MW)	57	52	46	41	34
عدد حالات الحدوث	12	83	107	116	47

حيث:

O_k: مقدار الانقطاع الرابع في جدول احتمالية انقطاع سعة النظام.

t_k: عدد الوحدات الزمنية في فترة الدراسة التي يؤدي فيها انقطاع بمقدار Ok إلى فقدان الحمل.

يمكن الحصول على مؤشر LOLE نفسه باستخدام منحنى تغير ذروة الحمل اليومي.و يوضح الشكل 6-15 علاقة نموذجية بين حمل النظام وسعته، حيث يُعرض نموذج الحمل كمنحنى متصل لفترة 365 يومًا. يساهم انقطاع معين في السعة في LOLE للنظام بمقدار يساوي حاصل ضرب احتمالية حدوث هذا الانقطاع وعدد الوحدات الزمنية في فترة الدراسة التي سيحدث خلالها فقدان الحمل في حال حدوث انقطاع في السعة. يتضح من الشكل 6-15 أن أي انقطاع في السعة أقل من الاحتياطي لن يساهم في LOLE للنظام.



الشكل 6- 15 العلاقة بين الحمل والسعة والاحتياطي.

حيث:

O_k: مقدار الانقطاع الرابع في جدول احتمالية انقطاع سعة النظام.

t_k: عدد الوحدات الزمنية في فترة الدراسة التي يؤدي فيها انقطاع بمقدار Ok إلى فقدان الحمل.

أما انقطاعات السعة التي تتجاوز الاحتياطي فستؤدي إلى اختلاف عدد الوحدات الزمنية التي قد يحدث خلالها فقدان الحمل. رياضيًا، تُحسب مساهمة انقطاع السعة O_k في LOLE للنظام بوحدة p من الوحدات الزمنية، حيث P^{-6} هي الاحتمالية الفردية لانقطاع السعة O_k. إجمالي LOLE لفترة الدراسة هو

$$LOLE = \sum_{k=1}^{n} P_k t_k \quad \text{وحدات زمن} \qquad (6.5)$$

تمثل قيم P_k في المعادلة (6.5) الاحتمالات الفردية المرتبطة بحالات انقطاع السعة. يمكن تعديل المعادلة لاستخدام الاحتمالات التراكمية للحالة.و في هذه الحالة تكون

$$LOLE = \sum_{k=1}^{n} P_k \left(t_k - t_{k-1}\right) \qquad (6.6)$$

ملاحظة: P_k = احتمالية الانقطاع التراكمية لحالة السعة O_k .

إذا كانت خاصية الحمل في الشكل 6-15هي منحنى مدة الحمل، فإن قيمة LOLE تكون بالساعات. أما إذا تم استخدام منحنى تغير ذروة الحمل اليومي، فإن قيمة LOLE تكون بالأيام لفترة الدراسة. ويمكن أن تكون فترة الدراسة أسبوعًا أو شهرًا أو سنة. وأبسط تطبيق هو استخدام المنحنى على أساس سنوي. إذا لم يتم إجراء أي صيانة لوحدة التوليد فسيكون جدول احتمالية انقطاع السعة صالحًا للفترة بأكملها.

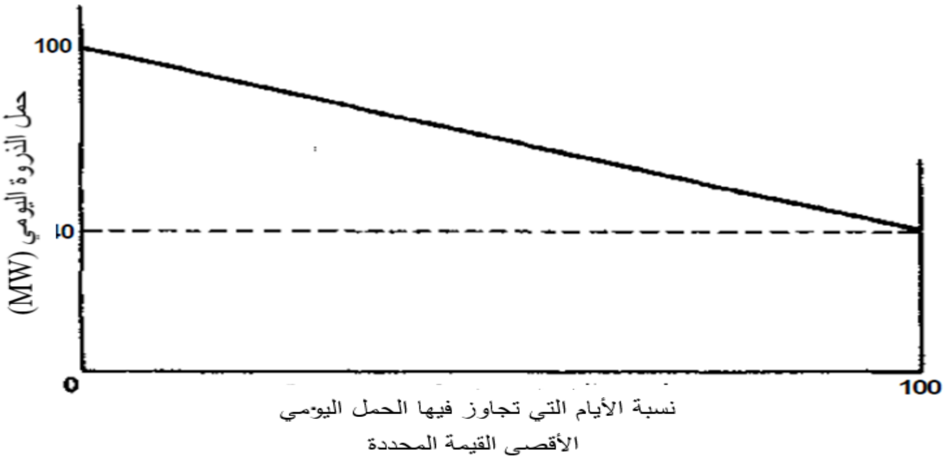
6-6-2 أمثلة عددية

دراسة أساسية

يمكن توضيح تطبيق المعادلتين (6.1) و(6.6) بمثال عددي بسيط.

مثال 6-3:

لنفترض نظامًا يحتوي على خمس وحدات، كل منها بقدرة 40 ميجاواط، ومعدل انقطاع قسري يبلغ 0.01. يُبين الجدول 6-11 جدول احتمالية انقطاع السعة لهذا النظام حيث تم إهمال قيم الاحتمالية الأقل من 10^{-6}. يُمثل نموذج حمل النظام بمنحنى تغير ذروة الحمل اليومي الموضح في الشكل 6-16 يُفترض أن هذا المنحنى خطي لتبسيط الحسابات اليدوية، على الرغم من أن هذا التمثيل الخطي من غير المرجح حدوثه عمليًا.



الشكل 6-16 منحنى تغير الحمل الأقصى اليوم .

تُفترض فترة الدراسة في هذه الحالة سنة واحدة، وبالتالي فإن 100% على المحور الأفقي يُقابل 365 يومًا.و في العديد من الدراسات، يتم إهمال عطلات نهاية الأسبوع والعطلات الرسمية لأن مساهمتها في LOLE ضئيلة.

الجدول 6-11 نموذج توليد الطاقة لنظام الوحدات الخمس. القدرة المركبة للنظام = 200 ميغاواط

السعة خارج الخدمة *Capacity out of service*	الإحتمالية الفردية *Individual probability*	الإحتمالية التراكمية *Cumulative probability*
0	0.950991	1.000000
40	0.048029	0.049009
80	0.000971	0.000980
120	0.000009	0 000009
	1.000000	

الجدول. 6-12 *LOLE* باستخدام الاحتمالات الفردية.

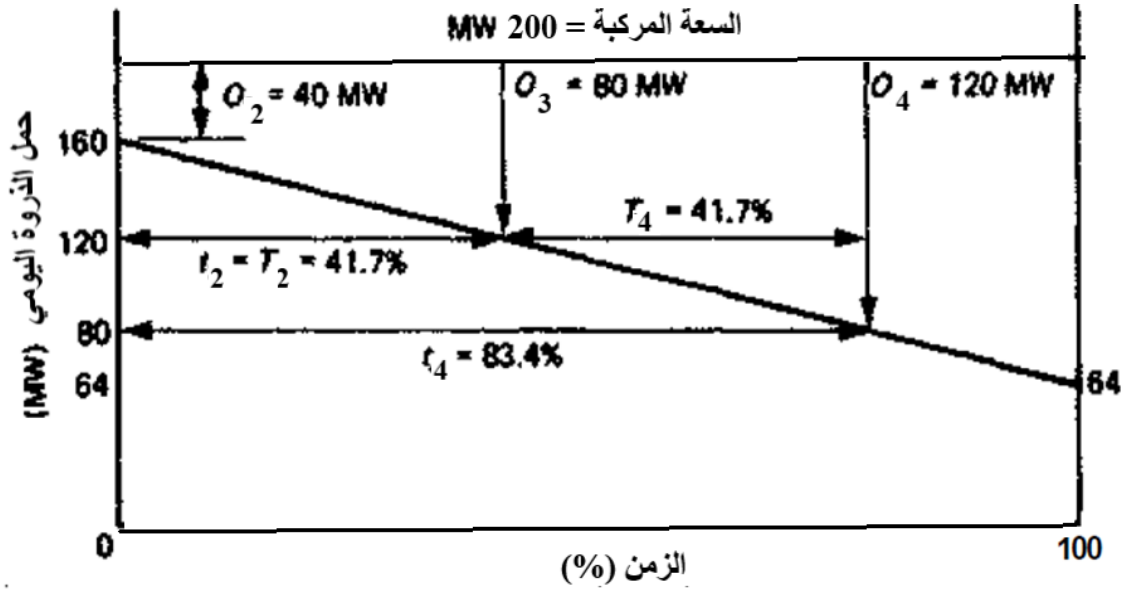
السعة خارج الخدمة *(MW)*	السعة داخل الخدمة *(MW)*	الإحتمالية الفردية	الزمن الكلي t_k (%)	*LOLE*
0	200	0.950991	0	—
40	160	0.048029	0	—
80	120	0.000971	41.7	0.0404907
120	80	0.000009	83.4	0.0007506
		1.000000		0.0412413

يبلغ المدى الزمني حينها حوالي 260 يومًا. ويبلغ الحمل الأقصى المتوقع لهذا النظام 160 ميجاواط، وهو ما يتوافق مع حالة 100% على المحور الرأسي. ويمكن إيجاد احتمالية انقطاع التيار الكهربائي (LOLE) باستخدام إما احتمالات انقطاع السعة الفردية أو باستخدام القيم التراكمية. يوضح هذا المثال كلا الطريقتين حيث يُبين الجدول 6-12الحساب باستخدام المعادلة (6.6). وتُعرض الفترات الزمنية في الشكل6-17 .

تبلغ احتمالية انقطاع التيار الكهربائي 0.0412413% من وحدات الأساس الزمني. بافتراض أن السنة تتكون من 365 يومًا، تصبح احتمالية انقطاع التيار الكهربائي 0.150410 يومًا أو 6.65 سنة في اليوم. كان من الممكن أن يكون المحور الأفقي، وبالتالي إجمالي الوقت t_k، بالأيام بدلًا من النسبة المئوية، مع الحصول على نتائج متطابقة.

في حال استخدام قيم الاحتمالية التراكمية، فإن الكميات الزمنية المستخدمة هي الفترة أو الزيادات في الوقت المختصر المُمثلة بـ T_k في الشكل 6-17. الإجراء موضح في الجدول 6-13.

قيمة LOLE البالغة 0.0412413% مطابقة للقيمة التي تم الحصول عليها سابقًا. كلا التقنيتين معروضتان فقط لتوضيح أن أيًا من النهجين سيعطي نفس النتيجة.



الشكل 6-17 : الفترات الزمنية التي يحدث خلالها فقدان الحمل.

الجدول 6-13 حساب LOLE باستخدام الإحتمالية التراكمية .

السعة خارج الخدمة *Capacity out of service (MW)*	السعة في الخدمة *Capacity in service (MW)*	الإحتمالية التراكمية	الفترة الزمنية *Time interval* T_k *(%)*	*LOLE*
0	200	1.000000	0	—
40	160	0.049009	0	—
80	120	0.000980	41.7	0.0408660
120	80	0.000009	41.7	0.0003753
				0.0412413%

7-6 دراسات الحساسية Sensitivity Studies

يبلغ حمل الذروة للنظام في المثال 6-1 السابق 160 ميجاواط. يوضح الجدول 6-14تغير المخاطر كدالة لحمل الذروة. خصائص الحمل لكل حمل ذروة متوقع هي تلك الموضحة في الشكل 6-16. يتم حساب LOLE على أساس سنوي بافتراض 365 يومًا في السنة.

الجدول 6-14 نتائج دراسة الحساسية.

حمل الذروة للنظام (MW)	*LOLE* (يوم / سنة)	(سنة / يوم)
200.0	6.083	0.16
190.0	4.837	0.21
180.0	3.447	0.29
170.0	1.895	0.53
160.0	0.1506	6.64
150.0	0.1208	8.28
140.0	0.08687	11.51
130.0	0.04772	20.96
120.0	0.002005	498
110,0	0.001644	608
100.0	0.001210	826

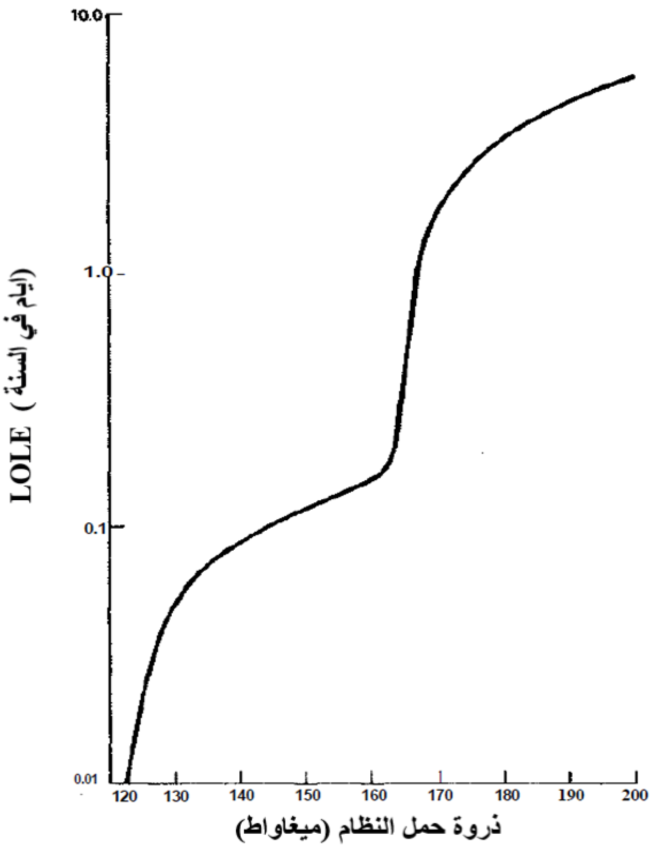
يمكن عرض هذه النتائج بشكل أفضل في شكل رسم بياني باستخدام ورق شبه لوغاريتمي كما هو موضح في الشكل 6-19 . تعتمد مخاطر النظام لتكوين سعة معين وحمل ذروة متوقع على قيم عدم التوافر للوحدات الفردية. هذا التأثير موضح في الجدول 6-15 يتم عرض قيم LOLE لمجموعة من مستويات حمل الذروة كدالة لمعدلات انقطاع التيار القسري للوحدات باستخدام نظام الجدول 6-11.

الجدول 6-15 تأثير FOR وحمل الذروة للنظام.

الحمل الأقصى للنظام *(MW)*	مستوى الخطر في النظام				
	مقدار FOR بالوحدة				
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
200.0	6.083	12.165	18.247	24.330	30.411
190.0	4.834	9.727	14.683	19.696	24.764
180.0	3.446	7.024	10.729	14.556	18.502
170.0	1.895	3.998	6.304	8.804	11·494
160.0	0.150	0.596	1.328	2.337	3.614
150.0	0.121	0,480	1.073	1.894	2.939
140.0	0.087	0.347	0.781	1.388	2.167
130.0	0.048	0.194	0.445	0.805	1.278
120.0	0.002	0.016	0.053	0.124	0.240

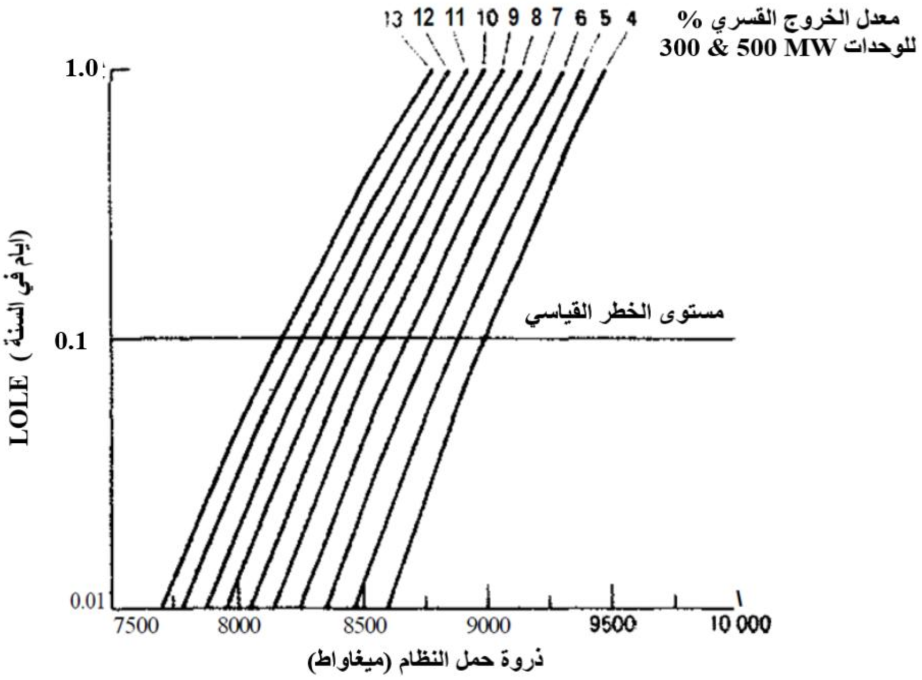
النظام المستخدم في هذا المثال صغير جدًا، وبالتالي فإن تأثير عدم وثوقية وحدة التوليد واضح للغاية. قد يكون هذا التأثير كبيرًا أيضًا في الأنظمة الكبيرة إذا كانت الوحدات الكبيرة تعاني من معدلات انقطاع قسري عالية. يُوضح ذلك في الشكل 6-20 . تبلغ السعة الإجمالية المركبة للنظام في هذه الحالة 10100 ميغاواط. تبلغ سعة أكبر الوحدات 300 ميغاواط و500 ميغاواط، وقد تم تغيير معدلات انقطاعها القسري كما هو موضح. يُظهر الشكل 6-20 منحنى المخاطر كدالة لحمل الذروة، وهو خط مستقيم تقريبًا، مقارنةً بالمنحنى الموضح في الشكل6-19 . يتميز النظام الكبير ذو الأحجام المتنوعة للوحدات بسعة أكثر استمرارية جدول احتمالية انقطاع التيار الكهربائي، مما ينتج عنه منحنى مخاطر أكثر سلاسة. ومع ذلك، يمكن أن يتأثر هذا المنحنى بإضافة وحدة كبيرة نسبيًا.

يمكن تحديد قدرة النظام على تحمل حمل الذروة (PLCC) كدالة لمستوى المخاطر. في النظام الموضح في الشكل 6-20 ، تبلغ قدرة النظام على تحمل حمل الذروة عند مستوى مخاطر 0.1 يوم/ سنة 9006 ميغاواط لمعدلات انقطاع قسري تبلغ 0.04. يوضح الجدول 6-16 التغير في قدرة النظام على تحمل حمل الذروة لقيم معدل الانقطاع القسري من 0.04 إلى 0.13. ويبلغ الانخفاض في قدرة النظام على تحمل حمل الذروة 815 ميغاواط. إذا كان الحمل الأقصى المتوقع 9000 ميغاواط، ومعدلات الانقطاع القسري للوحدات الكبيرة 0.13، فسيتعين على هذا النظام تركيب ما يقارب 1000 ميغاواط سعة إضافية لتلبية مستوى مخاطرة يبلغ 0.1 يوم/ سنة. ويمكن ملاحظة عواقب عدم توفر الوحدة من حيث السعة الإضافية بوضوح تام في هذا المثال .



الشكل 6-19: تغير المخاطر

مع ذروة حمل النظام.



الشكل 6-20 LOLE كدالة لوحدة FOR

جدول 6-16 التغيرات في (PLCC).

الإختلاف التراكمي (MW)	الإختلاف (MW)	قدرة تحمل الأحمال القصوى (MW)	معدل انقطاع التيار الكهربائي القسري (%)
—	—	9006	4
111	111	8895	5
213	102	8793	6
313	100	8693	1
404	91	8602	8
493	89	8513	9
579	86	8427	10
661	82	8345	11
739	78	8267	12
815	76	8191	13

الفصل 7

تقييم وثوقية نظام التوليد : مؤشرات فقدان الطاقة Loss of energy indices

1-7 مقدمة

في هذا الفصل ستتم مناقشة منهجية فقدان الطاقة والطاقة غير المجهزة في تقييم وثوقية نظام التوليد وتحديد المؤشرات اللازمة بهذا الخصوص . يستخدم منهج فقدان الطاقة القياسي منحنى تغير ذروة الحمل اليومي أو ذروة الأحمال اليومية الفردية لحساب عدد الأيام المتوقع خلال الفترة التي يتجاوز فيها الحمل اليومي ذروة القدرة المركبة المتاحة. ويمكن أيضًا حساب مؤشر فقدان الطاقة باستخدام منحنى مدة الحمل أو القيم الساعية الفردية. تمثل المساحة تحت منحنى مدة الحمل الطاقة المستخدمة خلال الفترة المحددة، ويمكن استخدامها لحساب الطاقة المتوقعة غيرالمجهزة (غير المُزوَّدة أو غير الموردة) بسبب عدم كفاية القدرة المركبة. ويمكن أيضًا التعبير عن نتائج هذا النهج بنسبة محتملة بين طاقة الحمل المخفضة بسبب نقص قدرة التوليد المتاحة وإجمالي طاقة الحمل المطلوبة لتلبية متطلبات النظام. وبالنسبة لمنحنى مدة حمل معين، تكون هذه النسبة مستقلة عن الفترة الزمنية المعتبرة، والتي عادةً ما تكون شهرًا أو سنة. تكون هذه النسبة عادةً رقمًا صغيرًا جدًا، أقل من واحد، ويمكن تعريفها بأنها "مؤشر الطاقة" لعدم الوثوقية. ومع ذلك، من الشائع طرح هذه القيمة من واحد،وبذلك نحصل على النسبة المحتملة بين طاقة الحمل التي سيتم توفيرها و إجمالي طاقة الحمل التي يحتاجها النظام. وهذا ما يُعرف بـ "مؤشر الطاقة" للوثوقية.

2-7 تقييم مؤشرات الطاقة Evaluation of energy indices

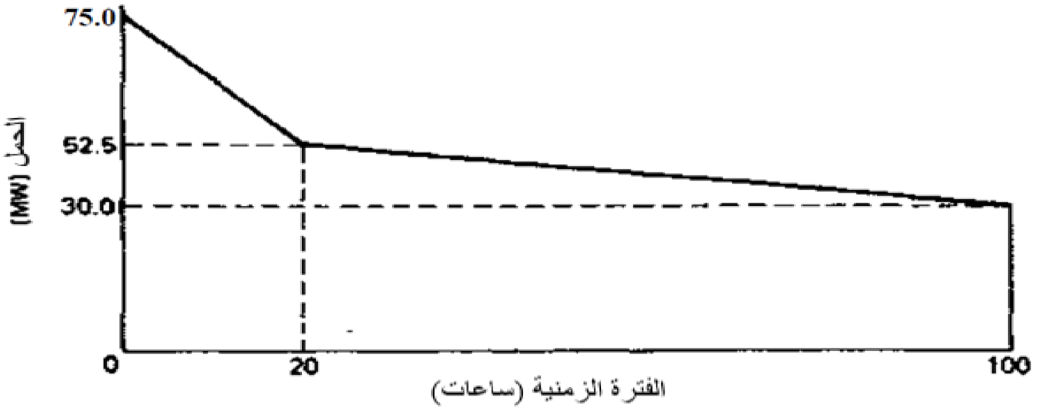
1-2-7 الطاقة المتوقعة غير المُزوَّدة (غيرالمجهزة) Expected energy not supplied

يمكن أيضًا استخدام مفهوم الطاقة المتوقعة غير المزودة لتحديد الطاقة المتوقعة التي تُنتجها كل وحدة في النظام، وبالتالي يُوفِّر نهجًا بسيطًا نسبيًا لنمذجة تكلفة الإنتاج. هذا النهج، مُوضَّح بالمثال التالي:

مثال 7-1 :

لنفترض منحنى مدة الحمل (LDC) الموضح في الشكل 7-1 لفترة 100 ساعة، وبيانات سعة وحدة التوليد الواردة في الجدول7-1. بافتراض أن ترتيب التحميل الاقتصادي هو الوحدات 1 و2 و3، فإن إجمالي الطاقة المطلوبة في هذه الفترة هو 4575.0 ميغاواط . ساعة، أي المساحة تحت منحنى التحميل الاقتصادي

في الشكل 7-1. إذا لم تكن هناك وحدات في النظام، فإن الطاقة المتوقعة غير المجهزة، EENS، ستكون 4575.0 ميغاواط (=EENS0). فإذا كان النظام يحتوي على الوحدة 1 فقط، فيمكن حساب EENS كما هو موضح في الجدول 7-1 .



الشكل 7-1 نموذج الحمل للمثال 7-1 .

الجدول 7-1 بيانات التوليد للمثال 7-1.

رقم الوحدة	السعة (MW)	الإحتمالية
1	0	0.05
	15	0.30
	25	0.65
2	0	0.03
	30	0.97
3	0	0.04
	20	0.96

الجدول 7-1 الطاقة غير المجهزة من الوحدة رقم 1 EENS.

السعة خارج الخدمة (MW)	السعة داخل الخدمة (MW)	الإحتمالية	تقلص الطاقة (MWh)	توقع (MWh)
0	25	0.65	2075.0	1348.75
10	15	0.30	3075.0	922.50
25	0	0.05	4575.0	228.75
				$EENS_1$ = 2500.0 MWh

الطاقة المتوقعة المنتجة بواسطة الوحدة رقم 1

$= EENS_0 - EENS_1$

= 4575.0 - 2500.0 = 2075.0 MWh.

يمكن الآن الحصول على مساهمة الوحدة 2 بإضافتها إلى نموذج السعة في الجدول 7-2 وحساب الطاقة الصافية المتوقعة للوحدتين 1 و2 معًا. ويُبين الجدول 7-2 ذلك. ويُبين الجدول 7-3 جدول احتمالية انقطاع السعة النهائي للوحدات الثلاث، وقيمة الطاقة الصافية المتوقعة للوحدة 3 هي 64.08 ميغاواط ساعة. المساهمة المتوقعة من الوحدة 3 هي 401.7 - 64.08 = 337.6 ميغاواط ساعة. يُلخص الجدول 7-4 7- مخرجات الطاقة المتوقعة لكل وحدة على حدة. الطاقة المتوقعة غير المُزودة في النظام المذكور أعلاه هي 64.08 ميغاواط ساعة. يمكن التعبير عن ذلك باستخدام مؤشر موثوقية الطاقة (EIR) من خلال المعادلتين (7.1) و(7.2) التاليتين:

$$LOEE_{p.u.} = \sum_{k=1}^{n} \frac{E_k P_k}{E} \qquad (7.1)$$

$$EIR = 1 - LOEE_{p.u.} \qquad (7.2)$$

$$EIR = 1 - \frac{64.08}{4575.0} = 0.985993$$

ولتوضيح الحالة التي يتم فيها تحميل الوحدة 1 إلى مستوى متوسط في ترتيب الأولوية قبل تحميلها إلى كامل طاقتها عند مستوى أولوية أعلى. يُعد تحديد مخرجات الطاقة المتوقعة للوحدة أمرًا بسيطًا نسبيًا في نظام لا توجد فيه قيود على الطاقة باستثناء تلك المرتبطة بانقطاعات قدرة التوليد. ويمكن للنهج الموضح أن يأخذ في الاعتبار أي عدد من الوحدات، ومستويات القدرة المخفضة، وعدم اليقين في توقعات الحمل، ونماذج المحطات، وقيود النقل الشعاعي. والمتطلب الأساسي هو القدرة على وضع جدول احتمالية انقطاع القدرة التسلسلي لقدرة توليد النظام.

الجدول7-2: الطاقة الكهربائية غير المجهزة (EENS) مع الوحدتين 1 و2

السعة خارج الخدمة (MW)	السعة داخل الخدمة (MW)	الإحتمالية	تقلص الطاقة (MWh)	توقع (MWh)
0	55	0.6305	177.8	112.10
iO	45	0.2910	475.0	138.23
25	30	0.0485	1575.0	76.39
30	25	0.0195	2075.0	40.46
40	15	0.0090	3075.0	27.68
55	0	0.0015	4575.0	6.86

$EENS_2 = 401.7$ MWh

الطاقة المتوقعة التي تنتجها الوحدة رقم 2
$= EENS_1 - EENS_2$
$= 2500.0 - 401.7 = $ 2098.3 MWh.

الجدول7-3: الطاقة الكهربائية غير المجهزة مع الوحدات 1 و2 و3

السعة خارج الخدمة (MW)	السعة داخل الخدمة (MW)	الإحتمالية	تقلص الطاقة (MWh)	توقع (MWh)
0	15	0.60528	0	
10	65	0.27936	44.4	12.40
20	55	0.02522	177.8	4.49
25	50	0.04656	286.0	13.32
30	45	0.03036	475.0	14.42
40	35	0.00864	1119.4	9.67
45	30	0.00194	1575.0	3.06
50	25	0.00078	2075.0	1.62
55	20	0.00144	2575.0	3.71
60	15	0.00036	3075.0	1.11
75	0	0.00006	4575.0	0.28
				64.08

الجدول 7-4 ملخص الطاقة غير المجهزة EENS .

الأولوية في تشغيل الوحدات	سعة الوحدة (MW)	EENS (MWh)	الطاقة الخارجة المتوقعة (MWh)
1	25	2500.0	2075.0
2	30	401.7	2098.3
3	20	64.1	337.6

7-2-2 المنهجية الثانية في احتساب مؤشر الطاقة غير المُجهزة المتوقعة (ϵENS)

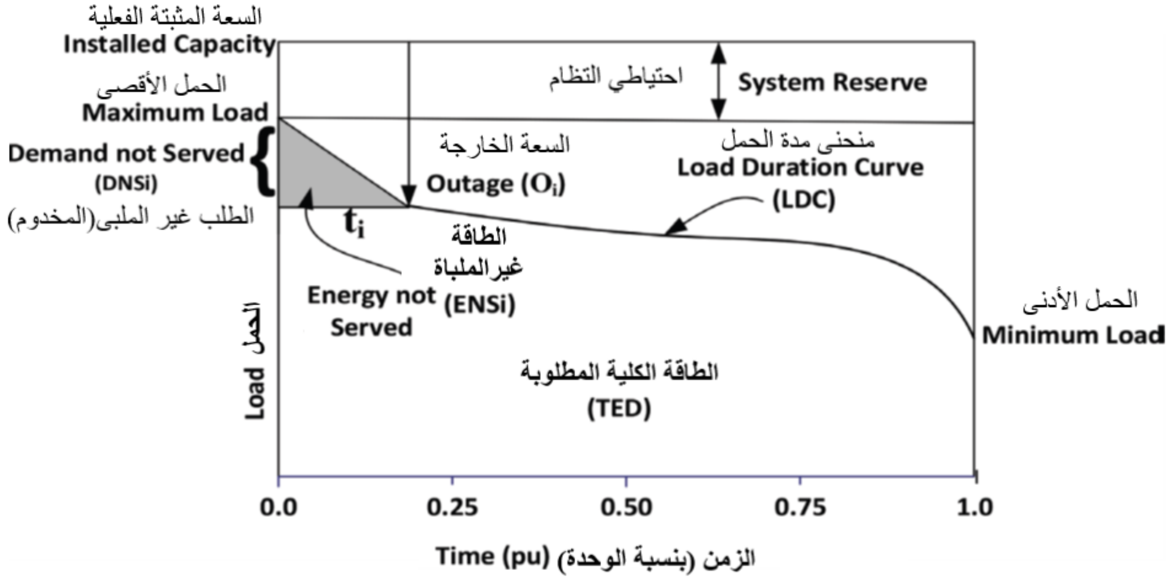
مؤشر الطاقة المتوقعة غير المُجهزة (ϵENS)، ويُعرَّف بأن الكمية المتوقعة من الطاقة التي لن تُجهز من وحدة (وحدات) التوليد الموجودة في النظام خلال الفترة المحددة نتيجةً لنقص في السعة أو انقطاعات مفاجئة شديدة في التيار الكهربائي. ويتزايد استخدام هذه المؤشرات حاليًا نظرًا لأهميتها من الناحيتين المادية والاقتصادية.

كذلك ،هناك مفهومان أساسيان يُؤخذان عادةً في الاعتبار عند تقييم وثوقية الشبكة، وهما: انتهاك الجودة وانتهاك الاستمرارية. يُراعي المعيار الأول انتهاك حدود الجهد (الفولتية) وانتهاك تصنيف الخط أو سعته

الاستيعابية، بينما يفترض المعيار الثاني أن الخطوط ذات سعة غير محدودة بحيث يمكن تحليل شبكات النقل والتوزيع بطريقة مشابهة للطريقة المستخدمة في تقييم وثوقية التوليد، أي احتمال عدم ضمان استمرارية الطاقة. وهذا من شأنه أن يُبسط حساب التردد والمدة في الشبكة وهو أمر ضروري. وبمعرفة مؤشرات وثوقية المكونات المناسبة، يُصبح من السهل نسبيًا حساب معدل الفشل المتوقع (λ) للنظام، ومتوسط مدة الانقطاع (r)، وعدم التوافرية (U). وللقيام بذلك، يلزم معرفة قيم λ وr وU لكل مكون من مكونات النظام .

إن مؤشر الطاقة المتوقعة غير الموردة يمكن استنتاجه وفقًا للشكل7-2. يُستخدم مؤشر ϵENS من أجل حساب مبيعات الطاقة، وهي الإيرادات الحقيقية لأي شركة كهرباء.

$$\epsilon ENS = \sum_{i=1}^{n} (ENS_i) \cdot p_i \, MWh/\text{سنة} \quad [L_{max} > \text{الإحتياطي}]$$



الشكل 7-2 منحنى مدة الحمل مع عدم توفير الطاقة.

3-7 مؤشر وثوقية الطاقة Energy Index Reliability (EIR)

يمكن إيجاد نسبة الطاقة المتوقعة غير المُجهزة (εENSpu) إلى إجمالي الطاقة المطلوبة للنظام Total Energy Demand (TED) كما يلي:

$$\varepsilon ENSpu = \varepsilon ENS / TED$$

في الواقع، هذه النسبة صغيرة جدًا نظرًا لصغر حجم ϵENS وكبر حجم TED، لذا يمكن استنتاج مؤشر وثوقية مهم آخر يُسمى مؤشر وثوقية الطاقة (EIR، Energy Index reliability) والذي يمكن التعبير عنه كما يلي:

$$EIR = 1 - \epsilon ENSpu$$

يمكن تقييم الطاقة المتوقعة المُجهزة (ϵES) من وحدات التوليد (الموجودة في النظام) باستخدام مفهوم الطاقة المتوقعة غير المُجهزة (ϵENS) الموصوف سابقًا حيث تأخذ هذه الطريقة في الاعتبار عدة عوامل:

• معدل انقطاع التيار الكهربائي القسري للوحدة (FOR).

• منحنى مدة الحمل (LDC).

• جدول السعة والتوافرية Capacity Availability Table (CAT)، وهو جدول يحتوي على جميع حالات السعة للوحدات التوليدية في النظام مرتبة تصاعديًا حسب توافرها.

• مستويات أولوية التحميل: تعني تحميل الوحدات وفقًا لأقل تكلفة تشغيلية لها، أي تشغيل الوحدات الأكثر كفاءة واقتصادية أولًا (وتسمى الوحدات الأساسية)، ثم الوحدات ذات التكلفة الأعلى (وتسمى الوحدات المتوسطة)، ثم الوحدات ذات التكلفة الأعلى (وتسمى الوحدات ذات ذروة الطلب)، وهكذا. وهذا يعني أن الوحدات ذات التكلفة الأقل تشغل المستويات الدنيا في نظام إدارة الطلب، بينما تشغل الوحدات ذات التكلفة الأعلى المستويات العليا.

4-7 طريقة تقييم الطاقة المتوقعة المُجهزة

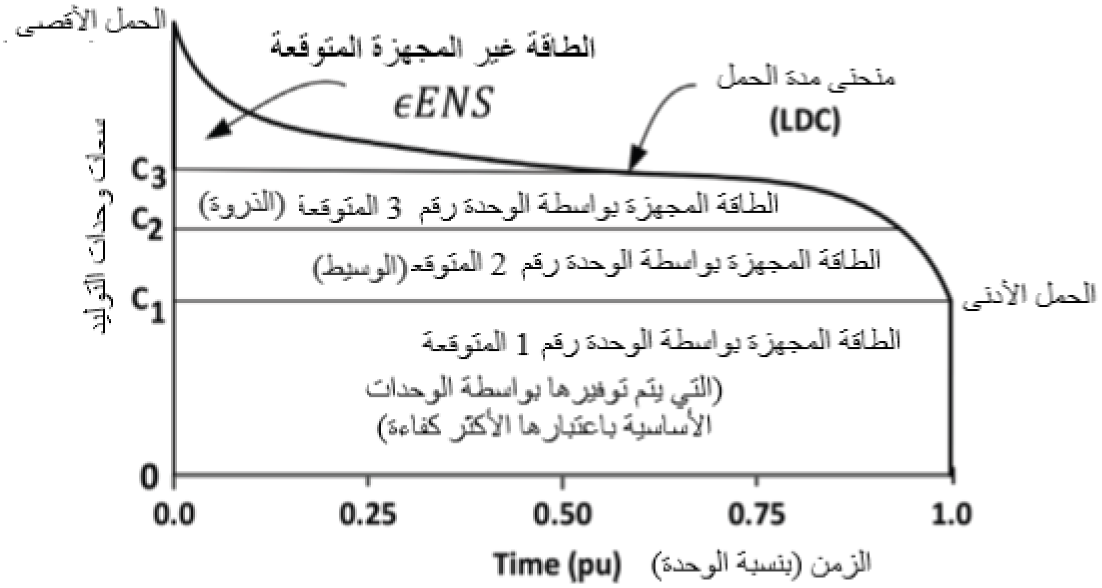
يمكن تقييم الطاقة المتوقعة المُجهزة εES من كل وحدة متاحة وقيد التشغيل في النظام باستخدام المفهوم المذكور أعلاه للطاقة المتوقعة غير المُجهزة εENS، كما هو موضح أدناه:

$$\varepsilon ESi = \varepsilon ENSi\ (1-\varepsilon ENSi)$$ (ميغاواط ساعة/سنة)

وتعتمد هذه الطريقة ترتيب تحميل ذي أولوية، أي يتم تحميل وحدات التوليد وفقًا لأقل تكاليف تشغيلها. الإجراء المطبق موضح أعلاه (انظر الشكل 7-3). يمكن تفسير العملية في الشكل أعلاه في الخطوات التالية:

• يتم تطبيق منحنى مدة الحمل، لأنه نوع المنحنى الأكثر استخدامًا في تقييم وثوقية أنظمة الطاقة وتخطيطها نظرًا لسهولة استخدامه ومرونته. وهو مشتق من منحنى الحمل العادي، وبالتالي يمكن تعريفه بأنه " ترتيب جميع مستويات الحمل بترتيب تنازلي من حيث المقدار".

• الطاقة المتوقعة غير المُجهزة εENS قبل تشغيل أي وحدة هي المساحة الكلية أسفل منحنى مدة الحمل.



الشكل 7-3. منحنى مدة التحميل الذي يوضح أولوية تحميل الوحدات.

- عند تحميل الوحدة الأولى (C1) وفقًا لمستوى التحميل ذي الأولوية رقم 1، فإنها ستشغل المنطقة (0-C1) وسترفع مستوى الطاقة المتوقعة غير المُجهزة εENS إلى الأعلى (أي فوق C1). لذلك،

$$\epsilon ES_1 = (\epsilon ENS_0) - \epsilon ENS_1.$$

ستكون الطاقة المتوقعة التي تُزوِّدها الوحدة: C1 = (εES1)

- عند تحميل الوحدة الثانية (C2) وفقًا لمستوى التحميل ذي الأولوية رقم 2، في هذه الحالة ستشغل المساحة (C1-C2) ثم ستنتقل الطاقة المتوقعة الجديدة غير المُزوَّدة **(*ϵDNS2*)** إلى أعلى. لذلك، ستكون الطاقة المتوقعة توفرها بواسطة الوحدة C2 **(*ϵDS2*)** **تساوي :**

$$\epsilon ES_2 = \epsilon ENS_1 - \epsilon ENS_2$$

.

- عند تشغيل الوحدة الثالثة (C3) وفقًا لمستوى التحميل ذي الأولوية رقم 3، ستشغل المساحة (C2-C3)ثم تنتقل الطاقة المتوقعة غير الموردة **(*ϵDNS2*)** إلى الأعلى، ثم تنتهي العملية، وستكون الطاقة المتوقعة المتبقية غير الموردة أعلى من C3. وبالتالي، ستكون الطاقة المتوقعة التي توفرها الوحدة C3 **(*ϵDS3*)** :

$$\epsilon ES_3 = \epsilon ENS_2 - \epsilon ENS_3$$

يوضح المثال التالي حالة مجمع صناعي يحتوي على وحدتي توليد وهما 80 ميغاواط و60 ميغاواط، وقد تم تخصيص أولوية تحميل لهما برقم "1" و"2" على التوالي. المطلوب تحديد كل من الطاقة المتوقعة المُزوَّدة εES ومؤشر موثوقية الطاقة ´EPR، وذلك لتحسين إنتاج الطاقة بأقل تكلفة تشغيل ممكنة.

مثال 7-2 :

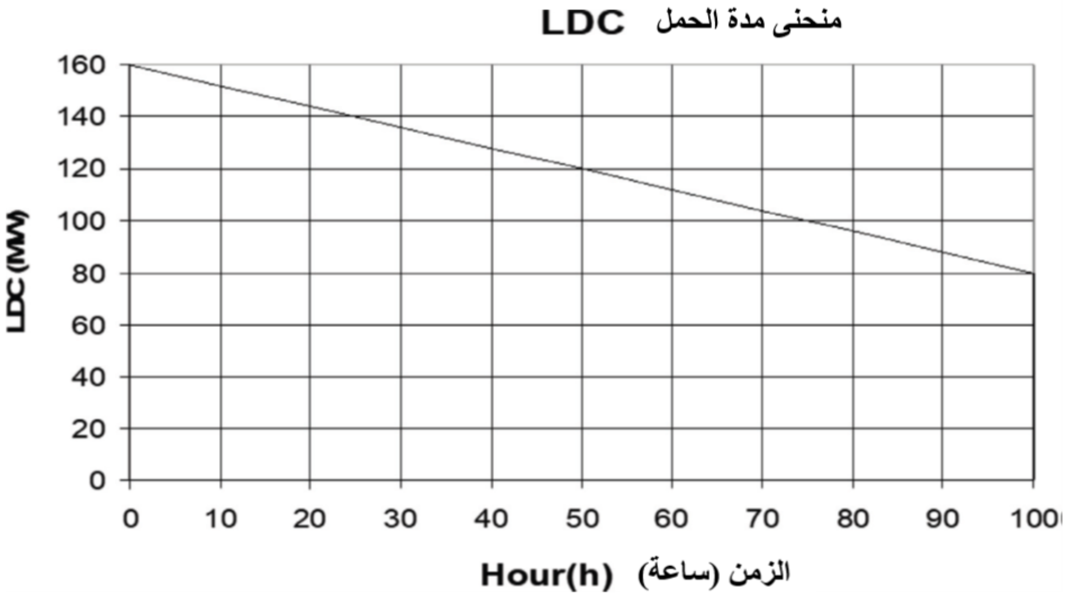
محطة توليد طاقة لديها البيانات التالية:

السعة (بالميغاواط) حسب أولوية التحميل 80 و 60 (الجدول 7-5).

الجدول 7-5.

السعة بالميغاواط Capacity (MW)	FOR	اولوية التحميل Loading priority
80	0.06	1
60	0.03	2

اعتبر أن منحنى توزيع الحمل LDC خطًا مستقيمًا يصل بين حمل أقصى قدره 160 ميجاواط وحمل أدنى 80 ميجاواط فإذا كان إجمالي وقت التشغيل 100 ساعة، (الشكل 7-4) احسب ما يلي:



الشكل7-4. منحنى مدة التحميل للمثال المذكور.

أ. الطاقة المتوقعة المُزوَّدة (εES) من كل وحدة في النظام

ب. مؤشر وثوقية الطاقة (EIR) للنظام

الحل :

أولاً، حساب الطاقة المتوقعة غير المُزوَّدة (**ϵDNS**) قبل تحميل أي وحدة في النظام، أي عند 0 ميغاواط، وهي:

$$\epsilon ENS_0[0\ W] = 80 \cdot 100 + \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot (160 - 80) = 12000\ \text{MWh (Area under the LDC)}$$
$$\epsilon ENS_0[0\ W] = 12000\ \cdot 1 = 12000\ \ \text{MWh}$$

الآن نبدأ بتحميل الوحدات التوليدية بدءًا من الوحدة الأولى (أي 80 ميغاواط كوحدة رقم 1 وفقًا لترتيب الأولوية رقم 1). هذا موضح في الجدول 7-5 .

$$\epsilon ENS_1[0\ \text{MW}] = 12000\ \cdot 0.06 = 720\ \text{MWh}$$

$$\epsilon ENS_1[80\ \text{MW}] = \left|\frac{1}{2} \cdot 100 \cdot (160 - 80)\right| (0 \cdot 94) = 3760\ \text{MWh}$$

لذلك، فإن إجمالي الطاقة المتوقعة التي لن يتم توفيرها بعد إضافة الوحدة الأولى سيكون

$$\epsilon TENS_1 = 720 + 3760 = 4480\ \ \text{MWh}$$

الآن، بتحميل الوحدة الثانية (أي وحدة بقدرة 60 ميغاواط كوحدة رقم 2 للأولوية الترتيب رقم 2)، ستكون قيمة CAT الجديدة في الجدول 7- 6 هي:

$$\epsilon ENS_2[0\ \text{MW}] = 1200 \times 0.0018 = 21.6\ \ \text{MWh}$$

$$\epsilon ENS_2[60\ \text{MW}] = 6000 \times 0.0582 = 349.2\ \ \text{MWh}$$

$$\epsilon ENS_2[80\ \text{MW}] = 4000 \times 0.0282 = 112.8\ \ \text{MWh}$$

$$\epsilon ENS_2[140\ \text{MW}] = 250 \times 0.9118 = 227.95\ \ \text{MWh}$$

الجدول7-6. نظام CAT عند مستوى ترتيب الأولوية رقم 1

System capacity (MW) سعة النظام	التوافرية Availability
0	0.06
80	0.94

الجدول7-7. نظام CAT عند مستوى ترتيب الأولوية رقم 2

System capacity (MW) سعة النظام	التوافرية Availability
0	0.06 × 0.03 = 0.0018
60	0.06 × 0.97 = 0.0582
80	0.94 × 0.03 = 0.0282
140	0.94 × 0.97 = 0.9118

لذلك، فإن إجمالي الطاقة المتوقعة التي لن يتم توفيرها بعد إضافة الوحدة الثانية سيكون

$$\epsilon TENS_2 = 21.6 + 349.2 + 112.8 + 227.95 = 711.55 \text{ MWh}$$

وبناءً على ذلك، يمكن تقدير الطاقة المتوقعة التي توفرها الوحدة بقدرة 80 ميغاواط على النحو التالي:

$$\epsilon ES_2 = \epsilon TENS_1 - \epsilon TENS_2 = 4480 - 711.55 = \mathbf{3608.45} \quad \text{MWh}$$

وبالتالي، ستخدم الوحدة رقم 1 (80 ميغاواط) 7520 ميغاواط ساعة ، وستخدم الوحدة رقم 2 (60 ميغاواط) 3608.45 ميغاواط ساعة.

الآن، يبلغ إجمالي الطاقة المتبقية المتوقعة غير المُزوَّدة **(ϵDNS2)** ميغاواط ساعة لهذا النظام 711.55 ميغاواط ساعة، ويمكن تقييم مؤشر وثوقية طاقة النظام (EIR) على أنه

$$EIR = 1 - \frac{\epsilon TENS_2}{\epsilon TENS_0} = 1 - \frac{711.55}{12000} = 0.94$$

5-7 تحليل توسيع القدرة التوليدية Expansion Studies

1-5-7 أساليب التقييم

قد تستغرق الفترة الزمنية اللازمة لتصميم وبناء وتشغيل محطة توليد طاقة كبيرة من 5 إلى 10 سنوات، وذلك تبعًا للمتطلبات البيئية والتنظيمية. لذا، يصبح من الضروري تحديد متطلبات النظام قبل وقت كافٍ من تاريخ بدء تشغيل الوحدة. كما أن الحمل الفعلي في المستقبل البعيد غير مؤكد، ويجب اعتباره متغيرًا عشوائيًا.وسيناقش هذا الجانب في 7-7 من هذا الفصل .

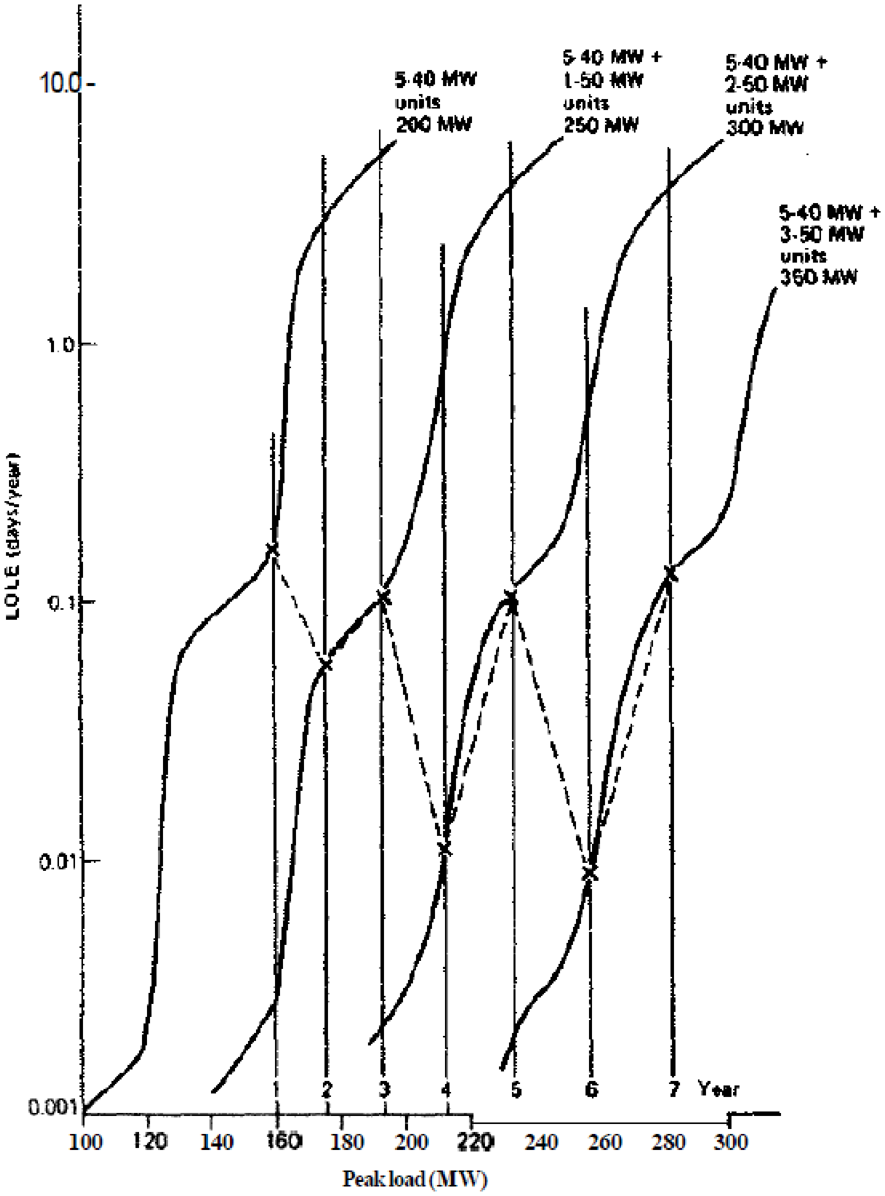
يمكن توضيح مفهوم تحليل توسيع القدرة التوليدية باستخدام النظام المكون من خمس وحدات بقدرة 40 ميغاواط ، المعطى في المثال 6-2 في الفصل السادس والموضح نموذج التوليد له في الجدول6-11. لنفترض أنه قد تقرر إضافة وحدات إضافية بقدرة 50 ميغاواط بمعدلات انقطاع قسري تبلغ 0.01 لتلبية نمو متوقع في الحمل بنسبة 10% سنويًا. السؤال هو: في أي سنوات يجب تشغيل هذه الوحدات لتلبية مستوى مخاطر النظام المقبول؟ يُبيّن الجدول 7-8 التغير في مستوى المخاطر مع الإضافة المتتابعة لوحدات 50 ميغاواط لنطاق من أحمال الذروة للنظام. يُقاس مستوى فقدان الطاقة (LOLE) بالأيام لسنة مكونة من 365 يومًا. خاصية الحمل هي منحنى تغير حمل الذروة اليومي باستخدام خط مستقيم من 100% إلى 40 % المبين في الشكل 6-16 (الفصل 6).

يمكن عرض النتائج الواردة في الجدول 7-8 مرة أخرى في شكل رسم بياني كما هو موضح في الشكل 7-5. ويُبين الجدول 7-9 ذروة الحمل السنوي لكل سنة من السنوات الثماني القادمة.

الجدول 7-8 قيمةLOLE في التوليد نتيجة نمو الحمل .

ذروة حمل النظام	LOLE (ايام في السنة)			
MW	السعة 200 MW	السعة MW250	السعة 300 MW	السعة 350 MW
100.0	0.001210	—	—	—
120.0	0.002005	—	—	—
140.0	0.08686	0.001301	—	—
160.0	0.1506	0.002625	—	—
180.0	3.447	0.06858	—	—
200.0	6.083	0.1505	0.002996	—
220.0	—	2,058	0.03615	—
240.0	—	4.853	0.1361	0.002980
250.0	—	6.083	0.1800	0.004034
260.0	—	—	0.6610	0.01175
280.0	—	—	3.566	0.1075
300.0	—	—	6.082	0.2904
320.0	—	—	—	2.248
340.0	—	—	—	4.880
350.0			—	6.083

بافتراض أن القدرة المركبة البالغة 200 ميغاواط كافية لحمل ذروة النظام البالغ 60 ميغاواط، فإن معيار المخاطرة هو 0.15 يوم/ سنة. يمكن استخدام مستوى المخاطرة هذا لقياس مدى كفاية قدرة النظام في السنوات اللاحقة. يجب إدراك أنه كان من الممكن اختيار أي مستوى مخاطرة آخر للتحليل. الخيار الفعلي هو قرار إداري. باستخدام معيار 0.15 يوم/ سنة، يمكن الحصول على توقيت إضافات الوحدات باستخدام الشكل 7-5. يظهر هذا التوسع في الجدول 7-10 .



الشكل 7-5 تغير المخاطر مع إضافة الوحدات.

الجدول 7-9 نمو الحمل بمقدار 10% سنوياً.

رقم السنة Year number	ذروة الحمل المتوقعة Forecast peak load (MW)
1	160
2	176
3	193.6
4	213.0
5	234.3
6	257.5
7	283.1
8	311.4

يجب إضافة وحدات بقدرة 50 ميغاواط في السنوات 2 و4 و6. يُظهر الخط المنقط في الشكل 7-5 التغير في مستوى المخاطر السنوي. تمثل دراسة التوسع هذه حالة مثالية إلى حد ما. يجب مقارنة القيمة الحالية لهذا المخطط المحدد مع غيره لتحديد نمط التوسع الأمثل للنظام. ينبغي أن تغطي دراسة التوسع فترة طويلة كافية في المستقبل لإجراء تقييم واقعي للقيمة الحالية، ولتقليل تأثيرات الاضطراب (انظر الفقرة7-4-2). نظريًا، ينبغي أن تمتد هذه الفترة إلى ما لا نهاية؛ ومع ذلك، عمليًا، عادةً ما تكون فترة من 20 إلى 10 سنوات كافية. يمكن، وربما سيتم، تعديل خطة توسيع التوليد مع تقدم الوقت الفعلي.

الجدول 7-10 نتائج دراسة توسيع قدرة التوليد.

رقم السنة	الوحدة المضافة Unit added (MW)	سعة النظام System capacity (MW)	ذروة الحمل (MW)	LOLE (ايام في السنة)
1	—	200	160.0	0.15
2	—	200	176.0	2.9
	50	250	176.0	0.058
3	—	250	193.6	0.11
4	—	250	213.0	0.73
	50	300	213.0	0.011
5	—	300	234.3	0.11
6	—	300	257.4	0.55
	50	350	257.4	0.009
7	—	350	283.1	0.125
8	—	350	311.4	0.96

7-5-2 تأثيرات الاضطراب

غالبًا ما تبدو إضافة وحدات ذات سعة كبيرة مجدية اقتصاديًا نظرًا لما يُعرف بـ ما يُسمى بـ "وفورات الحجم". تتميز الوحدات الكبيرة عمومًا بانخفاض تكلفة تركيبها نسبيًا، ومعدلات استهلاك حراري أفضل من الوحدات ذات السعة الأصغر. ومع ذلك، ينبغي أن يشمل التقييم الاقتصادي للأحجام البديلة تأثير إضافة وحدة كبيرة نسبيًا إلى النظام ككل على وثوقية النظام. ويمكن ملاحظة هذا التأثير من خلال زيادة قدرة النظام على تحمل ذروة الحمل (IPLCC) increased system peak load-carrying capability نتيجةً لإضافة الوحدات.

باستخدام الشكل 7-5، يمكن تحديد قدرة النظام على تحمل ذروة الحمل (IPLCC) لكل وحدة إضافية بقدرة 50 ميجاواط عند مستوى مخاطرة محدد. يوضح الجدول 7-11 قيم قدرة النظام على تحمل ذروة الحمل (IPLCC) الفردية والتراكمية لكل وحدة بقدرة 50 ميجاواط عند مستوى مخاطرة للنظام يبلغ 0.1 يوم/ سنة

الجدول 7-11 1PLCC زيادة قدرة النظام على تحمل ذروة الحمل.

التراكمية	الفردية	ذروة الحمل المسموح بها	سعة النظام System capacity (MW)
الزيادة في قدرة تحمل الأحمال القصوى MW			
0	0	144	(40×5) = 200
42	42	186	(40×5)+ (1x50) =250
88	46	232	(40×5) + (2 x 50) = 300
135	47	279	(40×3) + (3x50) =350

إن وحدات الـ 50 ميغاواط المضافة إلى النظام في هذه الحالة ليست أكبر بكثير من وحدات الـ 40 ميغاواط الموجودة بالفعل في النظام، وبالتالي فهي لا تُحدث اضطرابًا كبيرًا. ويمكن ملاحظة تأثير إضافة وحدات كبيرة نسبيًا إلى النظام من خلال إضافة وحدات الـ 50 ميغاواط إلى نظام له نفس السعة الأولية البالغة 200 ميغاواط، ولكن بتركيبة وحدات مختلفة.

لنفترض نظامًا يتكون من 10-20 وحدة، كل منها بقدرة 10-20 ميجاواط، ومعدل انقطاع إجباري يبلغ

0.01. تبلغ القدرة المركبة الإجمالية في هذه الحالة 200 ميجاواط ، وستتطلب نفس سعة الاحتياطي التي يتطلبها نظام الوحدات 5 × 40 ميجاواط باستخدام معيار النسبة المئوية للاحتياطي يشير معيار فقدان أكبر وحدة إلى أن نظام الوحدات 5 × 40 ميجاواط يمكنه تحمل حمل ذروة يبلغ 160 ميجاواط، بينما يمكن

لنظام الوحدات 20 × 10 ميجاواط تحمل حمل ذروة يبلغ 190 ميجاواط. تجدر الإشارة إلى أن أيًا من المعيارين لا يأخذ في الاعتبار شكل الحمل الفعلي. يوضح الجدول 2.21 قيم تكلفة دورة حياة المنتج الفردية والتراكمية لكل إضافة 50 ميجاواط إلى نظام الوحدات 20 × 10 ميجاواط عند مستوى مخاطر النظام 0.1 يوم/سنة.

الجدول 7-12 IPLCC زيادة قدرة النظام على تحمل ذروة الحمل لنظام مكون من 20 وحدة.

سعة النظام System capacity (MW)	ذروة الحمل المسموح بها	الزيادة في قدرة تحمل الأحمال القصوى MW	
		الفردية	التراكمية
(20x40) =200	184	0	0
(20 x 10)+ (1 x 50) = 250	202	18	18
(20 x 10) + (2 x 50) = 300	250	48	66
(20 x 10) + (3 x 50) = 350	298	48	114

تختلف قدرة تحمل الأحمال الأولية للنظامين اختلافًا كبيرًا. إذ يمكن للنظام ذي الوحدات الأصغر تحمل أحمال ذروة أعلى بكثير. تُحدث إضافة الوحدة الأولى بقدرة 50 ميغاواط اضطرابًا كبيرًا في هذا النظام، وتؤدي إلى قدرة تحمل أحمال أولية تبلغ 18 ميغاواط فقط. ويبدو أن الوحدة الثانية تُحدث قدرة تحمل أحمال أولية تبلغ 48 ميغاواط. مع ذلك، قد يكون من الأفضل التفكير من منظور القيمة التراكمية البالغة 66 ميغاواط الناتجة عن إضافة وحدتي 50 ميغاواط. لا يمكن إضافة وحدات كبيرة نسبيًا بسهولة إلى أنظمة صغيرة أو إلى أنظمة تتكون من وحدات صغيرة نسبيًا، دون زيادة كبيرة في قدرة تحمل الأحمال الأولية. ستتضاءل هذه الزيادة مع إضافة وحدات إضافية وتغير التركيب الأساسي للنظام. هذا أحد الأسباب التي تجعل إضافة الوحدات ضرورية في إطار خطة توسعة، ويجب النظر فيها على مدى فترة زمنية معقولة بدلًا من النظر إليها على أساس سنة واحدة أو إضافة وحدة واحدة.

ويتفاقم هذا التأثير إذا زاد معدل انقطاع التيار الكهربائي القسري للوحدة في السنوات القليلة الأولى لاستيعاب فترة انقطاع التيار أو توقفه المبكر. ومن الممارسات الشائعة لشركات المرافق مضاعفة معدل انقطاع التيار الكهربائي القسري للوحدة خلال السنتين الأوليين، خاصةً إذا كان حجم الوحدة أو نوعها مختلفًا بشكل كبير عن الوحدات الأخرى في النظام وكانت الخبرة المتوفرة قليلة. إن استخدام تقنيات الاحتمالات، حتى في الشكل البسيط نسبيًا لتقييم LOLE، يسمح بإدراج العوامل التي تؤثر على موثوقية النظام في التحليل، ويعطي وزنًا مناسبًا لأحجام الوحدات ومعدلات انقطاع التيار وخصائص حمل النظام.

مثال 7- 3

افترض مستوى مخاطرة مقبولًا قدره 0.1 يوم/سنة ومعدل نمو سنوي قدره 10%. وافترض أيضًا أن ذروة الحمل في السنة الأولى من الدراسة تبلغ 220 ميغاواط، مُزوَّدة من نظام توليد مكون من 5 وحدات، كل منها بقدرة 60 ميغاواط، ومعامل استجابة (FOR) قدره 0.01. وافترض كذلك أن شكل منحنى خصائص الحمل يبقى ثابتًا، ويُحدد بمنحنى خطي .

إذا كانت مدة الدراسة 8 سنوات، فإن ذروة الحمل في كل سنة ستكون كالتالي:

Year	1	2	3	4	5	6	7	8
Peak load (MW)	220	242	266	293	322	354	390	429

باستخدام الأسلوب في المثال السابق لاستنتاج الخسارة المتوقعة في الحمل في كل عام من الدراسة، سيتم تحقيق خطة التوسع التالية إذا تمت إضافة وحدات 60 ميغاواط ، ويوضح الجدول التالي 7-13 خطة التوسيع المقترحة.

الجدول 7-13 نتائج دراسة توسيع قدرة التوليد.

Year	Generating system (MW)	Loss of load (D/year)	Comment
1	5x60	0.10	
2	5x60 6x60	0.15 0.01	New unit to be added
3	6x60	0.09	
4	6x60 7x60	0.19 0.01	New unit to be added
5	7x60 8x60	0.11 0.01	New unit to be added
6	8x60	0.01	
7	8x60 9x60	0.23 0.01	New unit to be added
8	9x60	0.1	

يتضح مما سبق أنه بالنسبة للنظام قيد الدراسة، ينبغي إضافة وحدة بقدرة 60 ميغاواط في السنوات 2 و4 و5 و7، بينما يمكن إبقاء النظام دون تغيير في السنوات 1 و3 و6 و8.

من الواضح أن دراسة التوسعة هذه لا يمكن إجراؤها بمعزل عن غيرها، بل يتطلب الأمر تحليلًا للقيمة الحالية للتكلفة لتحديد خطة التوسعة الأمثل. مع ذلك، ينبغي أن يشكل هذا النوع من التحليل جزءًا لا يتجزأ من عملية التخطيط.

6-7 إدراج الصيانة Inclusion of Maintenance

لقد افترضنا حتى الآن أن نظام التوليد يظل ثابتًا طوال العام. من الواضح أن هذا ليس هو الحال، إذ سيتم إزالة بعض الوحدات لإجراء الصيانة الدورية. وتؤدي انقطاعات الصيانة إلى تقليل القدرة المتاحة، لذلك يجب أن تنعكس هذه في نموذج التوليد كأن تمثل الصيانة كطاقة متاحة مخفّضة.وهناك عدة طرق لتحقيق ذلك، إحداها فقط هي الطريقة الدقيقة.

تتضمن الطريقة الدقيقة تعديل جدول احتمالية انقطاع الطاقة بحيث يتم نمذجة نظام التوليد الحقيقي. قد تستغرق هذه العملية وقتًا طويلاً، ولكن يمكن تبسيطها بإزالة الوحدات من الجدول كما هو موضح سابقًا، بدلاً من إنشاء جدول جديد يتضمن جميع هذه الوحدات.

لتبسيط الأمر، يمكن استخدام إجراءين بدلاً من تعديل الجدول؛ الأول هو طرح سعة الصيانة من السعة المركبة، وبالتالي تقليل الاحتياطي دون تغيير جدول احتمالية السعة. أما الثاني فهو إضافة سعة الصيانة إلى الحمل. إذا كانت الصيانة تُجرى فقط خلال فترة انخفاض الحمل، وكانت خصائص الحمل تغطي السنة بأكملها، تُضاف سعة الصيانة إلى فترة انخفاض الحمل فقط. وسيتم توضيح ذلك في طريقة التمثيل البياني التي سنأتي على شرحها لاحقا . من الواضح أن الطريقتين الأخيرتين ستكونان تقريبيتين، على الرغم من إمكانية إهمال الأخطاء إذا كانت سعة الصيانة صغيرة جدًا مقارنةً بالسعة المركبة. وتُعطي هذه الطرق مخاطر محسوبة أكبر من المخاطر الحقيقية، والتي تزداد مع ازدياد نسبة السعة المتوقفة.

بداية دعنا نشرح الطرق المعتمدة في كيفية إدراج فترة الصيانة بصورة عامة ولنبدء بابسط الطرق وكالآتي:

لنفترض أن وحدة ما لديها: الطاقة المقدرة = C_i ، ومدة الصيانة المخططة = M_i ساعة/ سنة ،

أثناء الصيانة ، تكون طاقة تلك الوحدة غير متاحة ، لذا تصبح طاقة النظام الفعلية خلال فترة الصيانة:

$$C_{\text{المتاحة}} = C_{\text{المركبة}} - C_i \qquad (7.3)$$

أما الطرق والمنهجيات فيمكن تلخيصها كما يأتي:

- **طريقة دمج الصيانة في منهجية منحنى مدة الحمل LDC**

هناك طريقتان شائعتان.

الطريقة أ - تعديل جدول احتمالية انقطاع الطاقة LOLE (وهي الطريقة المفضلة):

في تقييم الوثوقية الاحتمالي Probabilistic approach: يتم تمثيل حالات الانقطاع القسري احتماليًا ثم تُضاف الصيانة المخططة كحالة انقطاع مجدولة بحيث تُعامل وحدة التوليد على أنها غير متاحة باحتمالية:

$$P_m = \frac{M_i}{8760} \qquad (7.4)$$

يؤدي هذا إلى تعديل توزيع احتمالية انقطاع النظام. ثم تُحسب مؤشرات الوثوقية، مثل:

- احتمالية فقدان الحمل (LOLP)
- متوسط فقدان الحمل المتوقع (LOLE)
- الطاقة المتوقعة غير المُخدَّمة أو الموردة (EENS)

باستخدام حالات الانقطاع المُعدَّلة. وهذه هي الطريقة الأكثر دقة.

الطريقة ب - تقسيم منحنى مدة الحمل LDC إلى فترات وتتضمن هذه الطريقة القيام بخطوات ثلاثة :

الخطوة 1: تقسّم السنة إلى:

- فترات الصيانة
- فترات عدم الصيانة

الخطوة 2: استخدم سعات متاحة مختلفة لكل فترة.

مثال: السعة المتاحة خلال الفترة التشغيل العادي: 500 ميغاواط

وأثناء صيانة الوحدة A تكون السعة المتاحة : 400 ميغاواط

الخطوة 3:

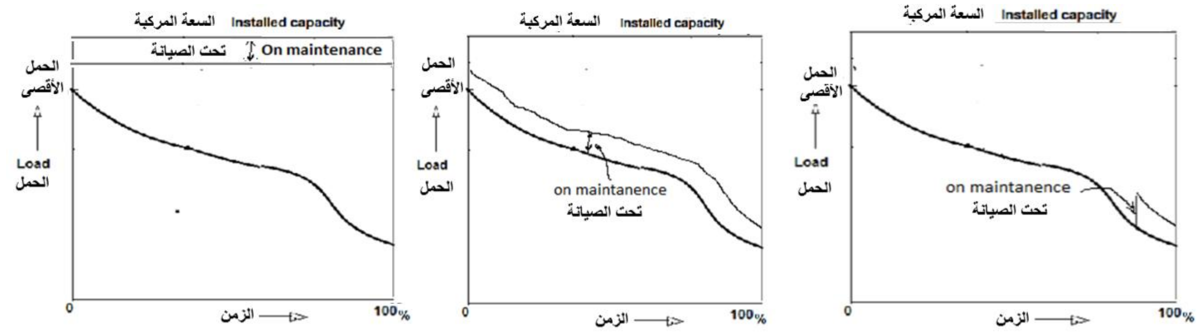
تقيّيم الوثوقية بشكل منفصل لكل جزء من أجزاء LDC حيث يؤدي فاصل الصيانة إلى انخفاض هامش الاحتياطي الفعال.

- **طريقة التفسير البياني**

في الوضع الطبيعي: يتقاطع خط السعة مع منحنى توزيع الحمل عند نقطة معينة. لكن مع إجراء الصيانة: ينخفض خط السعة خلال فترات الصيانة بحيث يؤدي هذا إلى زيادة الساعات التي يتجاوز فيها الحمل السعة المتاحة .LOLP/LOLE . أي أن

$$LOLE = P(L > C_{\text{المتاحة}}) \qquad (7.5)$$

حيث تُخفّض الصيانة السعة المتاحة في أوقات الصيانة كما موضح في الشكل 7- 14 .



الشكل 7- 6 التمثيل البياني لعمليات الصيانة .

- طريقة (منهجية) باستخدام منحنى مدة الحمل المكافئ (ELDC)

في دراسات الوثوقية المتقدمة يتم دمج انقطاعات الصيانة مع معدلات الانقطاعات القسرية بإنشاء منحنى مدة الحمل المكافئ بحيث يؤدي هذا فعليًا إلى رفع منحنى الحمل لمراعاة التوليد غير المتاح. وتُستخدم منهجية منحنى مدة الحمل المكافئ (ELDC) على نطاق واسع في تخطيط شبكات الكهرباء.

- اعتبارات عملية هامة

عادةً ما تُجدول الصيانة المخططة لها خلال مواسم انخفاض الأحمال لذلك يجب الأخذ بعين الإعتبار الآتي :

- لا تتوزع الصيانة عشوائيًا خلال فترة انخفاض الأحمال

• يتم تنسيقها لتقليل تأثيرها على الوثوقية

لذا تستخدم الدراسات الواقعية:

• فترات انخفاض الأحمال الموسمية

• المحاكاة الزمنية

• تحسين جدولة الصيانة

مثال 7-4 :

لنفترض نظام قدرة فيه القدرات المركبة = 1000 ميجاواط و الحمل الأقصى له = 900 ميجاواط ، تم إخراج وحدة توليد واحدة بقدرة 200 ميجاواط بحيث خضعت لعملية الصيانة لمدة 30 يومًا. في هذه الحالة تكون القدرة المتاحة خلال فترة الصيانة:

1000 - 200 = 800 ميجاواط

خلال هذه الأيام الثلاثين فان أي حمل يزيد عن 800 ميجاواط سيُساهم في خطر انقطاع التيار الكهربائي.

بيانيًا، ينخفض حد القدرة من 1000 ميجاواط إلى 800 ميجاواط خلال هذه الفترة من السنة.

الملخص

تُدرج فترات الصيانة في تقييم الموثوقية باستخدام نماذج توزيع القدرة (LDCs) من خلال:

1. تقليل قدرة التوليد المتاحة أثناء الصيانة

2. تعديل توزيعات احتمالية انقطاع التيار

3. تقسيم نموذج توزيع القدرة (LDC) إلى فترات صيانة وفترات أخرى غير صيانة

4. استخدام نماذج توزيع القدرة (ELDC) أو نماذج انقطاع التيار الاحتمالية لإجراء دراسات دقيقة

أما الممارسة الأكثر شيوعًا لدى شركات الكهرباء فهي:

• دمج انقطاعات الصيانة مع نماذج انقطاع التيار القسري،

• ثم تقييم احتمالية فقدان القدرة/فقدان الطاقة (LOLP/LOLE) باستخدام توزيع القدرة المعدل.

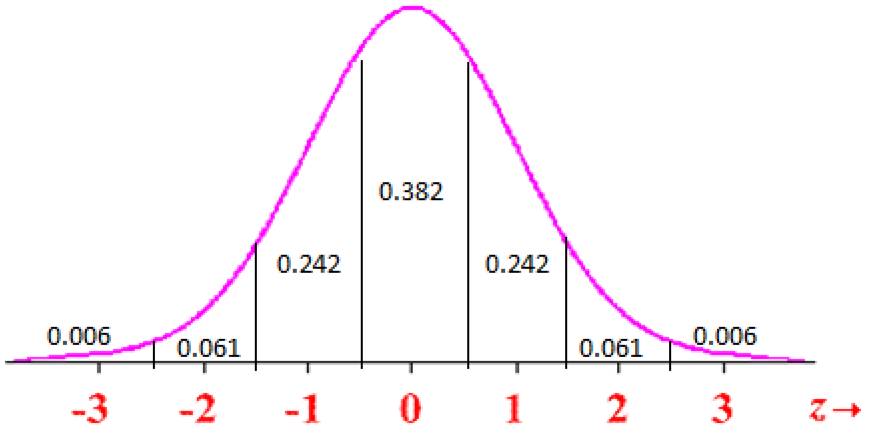
7-7 عدم اليقين في توقعات الأحمال Load Forecast Uncertainties

في الفقرات السابقة من هذا الفصل، افترضنا أن ذروة الحمل الفعلية ستختلف عن القيمة المتوقعة باحتمالية صفر. وهذا أمر مستبعد للغاية في الواقع العملي، حيث يتم التنبؤ عادةً بناءً على الخبرة السابقة. إذا تبين وجود قدر من عدم اليقين، فيمكن وصفه بتوزيع احتمالي يمكن تحديد معاييره من الخبرة السابقة، ونمذجة الأحمال المستقبلية والتقييم الذاتي المحتمل. يمكن تضمين عدم اليقين في توقعات الأحمال في حسابات المخاطر عن طريق تقسيم التوزيع الاحتمالي لتوقعات الأحمال إلى فئات، يعتمد عددها على الدقة المطلوبة. تمثل مساحة كل فئة احتمالية وجود الحمل. تمثل القيمة الوسطى للفئة الحمل. يتم حساب مستوى ذروة الحمل (LOLE) وبضرب كل حمل ممثل بالفئة في احتمالية وجود هذا الحمل. يمثل مجموع هذه النواتج مستوى ذروة الحمل (LOLE) للحمل المتوقع. يزداد مستوى المخاطر المحسوب مع ازدياد عدم اليقين في توقعات الأحمال.

من الصعب للغاية الحصول على بيانات تاريخية كافية لتحديد التوزيع الذي يصف عدم اليقين في توقعات الأحمال. ومع ذلك، تشير البيانات المنشورة إلى إمكانية وصف عدم اليقين بشكل معقول بواسطة التوزيع الطبيعي ويكون متوسط التوزيع هو ذروة الحمل المتوقعة. يمكن استخدام نهج مماثل لتمثيل التوزيع غير المتماثل عند الحاجة. وقد وُجد أن هناك فرقًا طفيفًا في النتيجة النهائية بين تمثيل توزيع عدم اليقين في توقعات الأحمال بسبع خطوات أو تسع وأربعين خطوة. ومع ذلك، يعتمد الخطأ على مستويات سعة النظام. يمكن تقسيم التوزيع الطبيعي إلى عدد محدد من الفترات المنفصلة، كل منها يعطي احتمال حدوث نقطة المنتصف لتلك الفترة. إذا كان متوسط قيمة التوزيع الطبيعي يمثل الحمل المتوقع، فيمكن استنتاج احتمال أن يكون هذا الحمل المتوقع خاطئًا من احتمال هذه الفترات. لتوضيح تطبيق هذه التقنية، سنقسم التوزيع الطبيعي إلى سبع فترات كما موضح في الشكل 7-14حيث تقع نقاط منتصفها عند -σ3، σ2-، σ1-، μ، σ1+، σ2+، و+σ3، حيث σ هو الانحراف المعياري وμ هو المتوسط. يمكن إيجاد احتمالات هذه الفترات من الجدول أو حسابها من معادلة التوزيع الطبيعي. كما يمكن استخدام نهج مماثل لتمثيل التوزيع غير المتماثل عند الحاجة. وقد وُجد أن هناك فرقًا طفيفًا في النتيجة النهائية بين تمثيل توزيع عدم اليقين في توقعات الأحمال بسبع خطوات أو تسع وأربعين خطوة. ومع ذلك، يعتمد الخطأ على مستويات سعة النظام. اذا تم استخدام الحمل المتوقع لتقييم LOLE، فسيكون مستوى المخاطر المحسوب متفائلاً لأنه من الممكن أن يكون الحمل أكبر من هذا الحمل المتوقع وسيكون النظام معرضًا للخطر.

يُشير تقسيم منحنى التوزيع الطبيعي إلى سبع خطوات إلى أن احتمال حدوث الحمل المتوقع يبلغ 0.382 فقط. وبالتالي، فإن احتمال حدوث الحمل المنخفض للغاية (LOLE) المرتبط بمستوى الحمل هذا يبلغ أيضًا

0.382 فقط. ولتقييم المخاطر الحقيقية للنظام، يجب تقييم الحمل المنخفض للغاية (LOLE) المرتبط بكل مستوى حمل منفصل، مع ترجيحه باحتمال حدوثه، ثم جمع جميع المساهمات معًا.



الشكل7-7 عدد الانحرافات المعيارية عن المتوسط (المتوسط = الحمل المتوقع).

ويوضح المثال التالي حساب LOLE مع مراعاة عدم اليقين في توقعات الحمل لنظام افتراضي صغير.

لنأخذ نظام التوليد في المثال 6-2 السابق الذي يتكون من 5 وحدات كل منها بقدرة 60 ميجاوات، حيث يبلغ معدل انقطاع التيار الكهربائي القسري لكل وحدة فيها 0.01 ، والذي يزود بحمل ذروة متوقع قدره 200 ميجاوات. في السابق، تم استنتاج أن فقدان الحمل المتوقع هو 0.052679 يوم / سنة.
لنفترض الآن أن هذا الحمل المتوقع هو متوسط قيمة التوزيع الطبيعي مع هامش خطأ بنسبة 10% (ويساوي تقريباً الانحراف المعياري). باستخدام الأسلوب السابق لتقييم مستوى الحمل الأقصى (LOLE) لكل مستوى من مستويات الحمل السبعة الممكنة، نحصل على الجدول 7-14 التالي:

الجدول 7-14 .

رقم الإنحراف المعياري Number of standard deviation	مستوى الحمل Load level (MW)	احتمالية مستوى الحمل probability of load level	Expected load loss(d/yr)	فقدان الحمل المتوقع (يوم / السنة) LOLE الموزون (عمود 3 × عمود 4) weighted LOLE (col.3 x col.4)
- 3	140	0.006	0.000522	0.000003
- 2	160	0.061	0.001043	0.000064
- 1	180	0.242	0.001564	0.000378
0	200	0.382	0.052679	0.020123
+ 1	220	0.242	0.103759	0.025110
+ 2	240	0.061	0.154874	0.009447
+ 3	260	0.006	2.711127	0.016267
				0.071392 D/yr

يتضح الجدول من 7-14 أعلاه ، أن قيمة LOLE قد ازدادت.

ويوضح المثال التالي حساب LOLE مع مراعاة عدم اليقين في توقعات الحمل لنظام افتراضي أكبر.

مثال 7-5

يتكون النظام من اثنتي عشرة وحدة، قدرة كل منها 5 ميغاواط، ومعدل انقطاع التيار الكهربائي القسري فيها 0.01. يُبين الجدول 7-15 نموذج السعة. يبلغ الحمل الأقصى المتوقع 50 ميغاواط، مع افتراض أن عدم اليقين يتبع التوزيع الطبيعي باستخدام تقريب من سبع خطوات (الشكل 7-7). الانحراف المعياري 2% من الحمل الأقصى المتوقع. يُمثل منحنى الحمل والمدة الشهري بخط مستقيم عند معامل حمل 70%.و يُبين الجدول 7-16 نتائج حساب LOLE.

ارتفع مؤشر فقدان الحمل المتوقع (LOLE) من 0.025240 في حالة عدم وجود عدم يقين في توقعات الحمل إلى 0.07839425 مع عدم يقين بنسبة 2%. ويُقاس المؤشر في هذه الحالة بالساعات/الشهر. يُعدّ عدم اليقين في توقعات الحمل معيارًا بالغ الأهمية، وفي ضوء عدم اليقين المالي والاجتماعي والبيئي الذي تواجهه شركات الطاقة الكهربائية، قد يكون المعيار الأهم في تقييم وثوقية القدرة التشغيلية. في المثال الموضح في الجدول 7-15، تم تقييم المخاطر لكل مستوى من مستويات ذروة الحمل. ثم تم ترجيح القيم السبع الفردية باحتمالية وجود مستوى ذروة الحمل هذا. ويمثل مؤشر فقدان الحمل المتوقع النهائي القيمة المتوقعة لمجموعة من توقعات فقدان الحمل.

الجدول 7-15 نموذج التوليد

السعة الخارجة عن الخدمة (MW)	الإحتمالية التراكمية
0	1.00000000
5	0.11361513
10	0.00617454
15	0.00020562
20	0.00000464
25	0.00000007

ملاحظات : (تُهمل قيم الاحتمالية الأقل من 10^{-6}.)

الفترة = شهر واحد = 30 يومًا = 720 ساعة

حمل التنبؤ = المتوسط = 50 ميغاواط

الانحراف المعياري = (%2) =50 × 100/2 = 1 ميغاواط

الجدول 7-16 نتائج حساب LOLE.

(1) عدد الإنحرافات المعيارية عن المتوسط	(2) الحمل (MW)	(3) الإحتمالية للحمل في العمود (2)	(4) توقع فقدان الحمل LOLE للحمل في العمود (2) (ساعات لكل شهر)	(3) × (4)
-3	47	0.006	0.01110144	0.00006661
-2	48	0.061	0.01601054	0.00097664
−1	49	0.242	0.02071927	0.00501406
0	50	0.382	0.02523965	0.00966679
+1	51	0.242	0.17002797	0.04114677
+2	52	0.061	0.30924753	0.01886410
+3	53	0.006	0.44321350	0.00265928
			Total	0.07839425

7-8 تقييم وثوقية نظام التوليد – طريقة المدة والتردد

Generating capacity—frequency and duration method

وضحت الفقرات السابقة من الفصلين السادس والسابع تطبيق أساليب الاحتمالات الأساسية على تقييم كفاية السعة الثابتة. وكانت المؤشرات الأساسية الموضحة في الفصلين المذكورين هي عدد الأيام (أو الساعات) المتوقعة في فترة زمنية محددة التي يتجاوز فيها الحمل السعة المتاحة، وكذلك الطاقة المتوقعة التي لم يتم توفيرها في تلك الفترة بسبب عدم كفاية السعة المركبة. هذه مؤشرات مفيدة يمكن استخدامها لمقارنة كفاية التكوينات والتوسعات البديلة. إلا أنها ، مع ذلك، لا تعطي أي مؤشر على تكرار حدوث حالة عدم كفاية السعة، ولا المدة التي يُحتمل أن تستمر فيها. وغالبًا ما يُساء تفسير مؤشر LOLE الذي يُقاس بالأيام في السنة، عند عكسه للحصول على سنوات/ يوم، على أنه مؤشر تكرار. مع ذلك، ينبغي اعتباره في شكله الأساسي على أنه عدد الأيام المتوقعة في السنة التي يتجاوز فيها الحمل السعة المركبة المتاحة.

لقد تم طُرح طريقة التردد والمدة لأول مرة لتقييم السعة عام 1958.وتعد هذه الطريقة معقدًة نوعًا ما، ولم تُستخدم المؤشرات فعليًا . وفي عامي 1968- 1969 تم تطوير خوارزميات تكرارية لبناء نموذج السعة و دمج نموذج الحمل، مما سهّل تطبيقها على الحاسوب الرقمي.و تتزايد المحاولات لدمج عناصر التوليد والنقل الرئيسية في إجراء تقييم شامل أو مُركب للنظام والذي يُمكنه توفير مؤشرات كفاءة نقطة الحمل والنظام ككل ؛ ويُعد مؤشر التردد والمدة من أكثر المؤشرات فائدة لتقييم العملاء أو نقاط الحمل، وبالتالي فإن إنشاء مؤشرات مماثلة لتقييم السعة يبدو أنه يُوفر توافقًا أكبر في التقييم الشامل.

يُوضح الشكل 6-4 في الفصل السادس المنهج الأساسي في التقييم ، لذلك سيتبع هذا الفصل بشكل أساسي التنسيق المُقدم في الفصل السادس المذكور، وذلك بتوضيح تطوير نماذج السعة، متبوعة بنماذج الأحمال، ثم عملية الالتفاف اللاحقة لإنشاء مؤشرات مخاطر النظام. وكما هو الحال في منهج LOLE، فإن التمثيل الأساسي للنظام هو الموضح في الشكل 6-5. وسيتم تقديم عناصر النقل في الفصل8.

تتطلب طريقة التردد والمدة (D&F) بيانات نظام إضافية إلى جانب تلك المستخدمة في الطرق الاحتمالية الأساسية. يوضح الشكل 6-3 (الفصل 6) النموذج الأساسي ثنائي الحالة لوحدة توليد الحمل الأساسي. وتستخدم طريقة LOLE أو طريقة LOEE معلم التوافرية في الحالة المستقرة A ومعلم عدم التوافرية U لهذا النموذج. كذلك تستخدم طريقة المدة والتردد ، بالإضافة إلى المعلمين U&A، ومعلمات معدل الانتقال λ و μ. وللحصول على شرح واف للمفاهيم الأساسية المرتبطة بتحليل التردد والمدة بشكل مفصل ينصح القارئ بالرجوع للكتب في أنظمة الهندسة للوثوقية ، لذلك سوف لن يتم التطرق اليها في هذا النص. مع ذلك، يمكن استنتاج العلاقة الأساسية من المعادلات الأساسية التالية :

$$\text{التوافرية } A = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \qquad (7.6)$$

$$f = A\lambda \qquad (7.7)$$

يُمثل تكرار مواجهة الحالة 0 في الشكل 6-4 احتمال التواجد في الحالة بضرب معدل الخروج منها. وفي حالة النموذج ثنائي الحالة، يساوي أيضًا احتمال عدم التواجد في الحالة بضرب معدل الدخول (المعادلة (6.1)(أ)). وبشكل أعم، يمكن التعبير عن تكرار حالة معينة كقيمة متوقعة رياضيًا لمواجهة الجدار الحدودي المحيط بتلك الحالة. ويساوي تكرار الدخول تكرار الخروج. وقد عُرض مفهوم توازن التكرار هذا في أنظمة الهندسة كوسيلة لصياغة معادلات لحل احتمالات نموذج انتقال الحالة.

7-9 نموذج التوليد - التطوير الأساسي

يمكن توضيح المفاهيم بسهولة أكبر باستخدام مثال عددي بسيط. يحتوي النظام الموصوف في الجدول 7-17 على البيانات الأساسية المطلوبة لكل من طريقة LOLE وطريقة D&F. يوضح هذا القسم تطوير نموذج السعة باستخدام العلاقة الأساسية الموضحة في المعادلة (3.1). هذا ليس نهجًا عمليًا لتحليل الأنظمة الكبيرة باستخدام الحاسوب الرقمي؛ ينبغي استخدام التقنية التكرارية الموضحة في القسم 3.2.2.

الجدول 7-17 بيانات النظام.

رقم وحدة التوليد Unit no.	السعة Capacity (MW)	معدل الفشل (فشل / اليوم) Failure rate (f / day)	معدل الإصلاح (إصلاح/اليوم) Repair rate (r / day)
1	25	0.01	0.49
2	25	0.01	0.49
3	50	0.01	0.49

إذا كان بإمكان كل وحدة أن توجد في حالتين، فإن عدد الحالات في النظام الكلي هو 2^n حالة حيث n = عدد الوحدات (أي 2^3 في هذه الحالة). يُبين الجدول 7-18 العدد الإجمالي للحالات في نظام الجدول7-17. ويمكن تمثيل هذه الحالات أيضًا بمخطط انتقال الحالة كما هو موضح في الشكل7-8. يُبين هذا المخطط جميع حالات النظام الممكنة، كما يُظهر أنماط الانتقال من حالة إلى أخرى. على سبيل المثال، إذا كان النظام في الحالة 2 حيث الوحدة 1 معطلة وباقي الوحدات تعمل، فيمكن للنظام الانتقال إلى الحالات 1 أو 5 أو 6 بالطرق التالية:

الجدول 7-18 أنماط الفشل وآثارها.

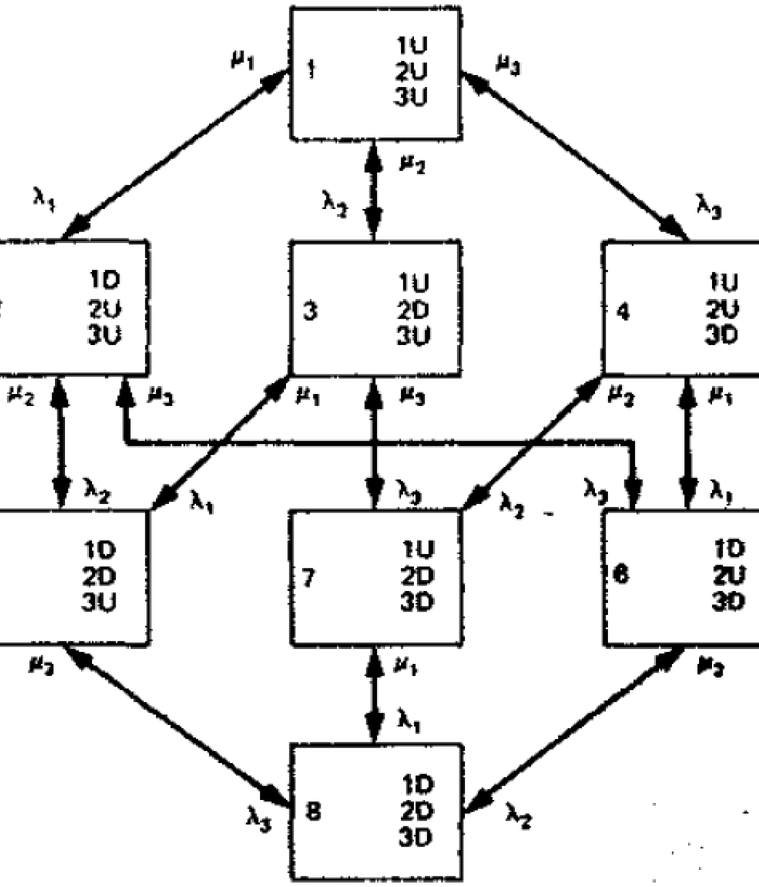
رقم الحالة	1	2	3	4	5	6	7	8
الوحدة رقم 1	U	D	U	U	D	D	U	D
الوحدة رقم 2	u	U	D	U	D	U	D	D
الوحدة رقم 3	u	U	U	D	U	D	D	D
السعة الخارجة عن الخدمة (MW)	0	25	25	50	50	75	75	100

من الحالة 2 إلى 1 في حال إصلاح الوحدة1 .

من الحالة 2 إلى 5 في حال تعطل الوحدة2 .

من الحالة 2 إلى 6 في حال تعطل الوحدة3.

وبالتالي، فإن المعدل الإجمالي للمغادرة من الحالة 2 هو مجموع معدلات المغادرة الفردية المعبر عنها بـ $(\mu_1+\lambda_2+\lambda_3)$. يمكن حساب الاحتمالات المرتبطة بكل حالة في الجدول 7-18 بسهولة بافتراض استقلال الأحداث. يتم الحصول على ترددات مواجهة كل حالة باستخدام المعادلة (3.1) عندما يكون معدل المغادرة أو الدخول هو مجموع المعدلات المناسبة. تظهر العمليات الأساسية في الجدول7-19.



الشكل7-8: مخطط فضاء الحالة لثلاث وحدات توليدية.

يحتوي الجدول 7-19على عدد من حالات السعة المتطابقة التي يمكن دمجها باستخدام المعادلات التالية حيث يشير الرمز السفلي i إلى الحالات المتطابقة و يشير k إلى الحالة المدمجة الجديدة.

الجدول 7-19نموذج التوليد.

رقم الحالة	السعة الخارجة عن الخدمة C_i (MW)	احتمالية حدوث الحالة P_i	تردد حدوث الحالة f (حدث في اليوم)
1	0	(0.98)(0.98)(0.98) = 0.941192	(0.941192)(0.03) = 0.02823576
2	25	(0.02X0.98X0.98)=0.019208	(0.019208)(0.51) = 0.00979608
3	25	(0.98)(0.02X0.98) = 0.019208	(0.019208)(0.51) = 0.00979608
4	50	(0.98)(0.98X0.02) = 0.019208	(0.019208)(0.51)=0.00979608
5	50	(0.02X0.02X0.98)=0.000392	(0.000392)(0.99) = 0.00038808
6	75	(0.02)(0.98X0.02)=0.000392	(0.000392X0.99)=0.00038808
7	75	(0.98X0.02X0.02)=0.000392	(0.000392X0.99)=0.00038808
8	100	(0.02)(0.02X0.02)=0.000008	(0.000008)(1.47)=0.00001176
		1.000000	

انقطاع السعة في الحالة k :

$$Ck = C1 = C2 = \ldots = C3$$

إحتمالية الحالة k :

$$P_k = \sum P_i \qquad (7.8)$$

تردد الحالة k

$$f_k = \sum f_i \qquad (7.9)$$

معدلات المغادرة عن الحالة k = $\lambda_{\pm k}$

$$\lambda_{\pm k} = \frac{\sum P_i \lambda_{\pm i}}{P_k} \qquad (7.10)$$

يُعرض النموذج المُختزل في الجدول 7-20 حيث تشير أرقام الحالة إلى الحالات المدمجة الجديدة.

الجدول 7-20 نموذج التوليد المختزل (المخفّض).

رقم الحالة State No.	السعة خارج الخدمة Capacity out (MW)	السعة في الخدمة Capacity in (MW)	الإحتمالية Probability p_k	التردد (الحدث في اليوم) Frequency (occ/day) f_k
1	0	100	0.941192	0.02823576
2	25	75	0.038416	0.01959216
3	50	50	0.019600	0.01018416
4	75	25	0.000784	0.00077616
5	100	0	0.000008	0.00001176

يُبيّن نموذج نظام التوليد، كما هو موضح في الجدول 7-20 ، احتمالية وتكرار خروج مستوى معين من الطاقة عن الخدمة، ومستوى الطاقة المُكمّل له في الخدمة. يمكن تعديل نموذج نظام التوليد هذا ليعطي احتمالات وتكرارات تراكمية، بدلاً من القيم المُقابلة لمستوى طاقة مُحدد. عند أي مستوى طاقة مُحدد،

تُعطي القيم التراكمية احتمالية وتكرار خروج تلك الطاقة أو أكثر عن الخدمة. يمكن دمج احتمالات وتكرارات الحالات الفردية لتكوين قيم الحالة التراكمية، باستخدام المعادلات التالية:

$$P_{n-i} = P_k + P_n \qquad (7.11)$$

$$P_{n-i} = P_k + P_n \qquad (7.12)$$

$$F_{n-i} = P_k\lambda_{+k} + F_n - P_k\lambda_{-k} \qquad (7.13)$$

حيث يشير n إلى الحالة التراكمية ذات الاحتمالية والتكرار المعروفين، و k هو الحالة التي يتم دمجها لتكوين الحالة التراكمية n - 1. تبدأ العملية لذلك من الحالة الأخيرة، حيث تكون القيم الفردية والتراكمية متساوية. تمثل قيم الانتقال λ_{-k} و λ_{-k} معدلات الانتقال إلى مستويات السعة المتاحة الأعلى والأدنى على التوالي. يمكن بدء العملية من الحالة 5 في الجدول 7-20.

الحالة 5 : C5 > 100 MW

$$P_5 = P_5 = 0.0000008$$

$$F_5 = f_5 = 0.00001176 \text{ / اليوم}$$

الحالة 4 : C4 > 75 MW

$$P_4 = P_4 + P_5$$

$$F_4 = F_5 + P_4\lambda_{+4} - P_4\lambda_{-4}$$

$$= 0.00001176 + 0.00076832 - 0.00000784$$

$$= 0.00077224 \text{/ اليوم}$$

يتم الحصول على قيم $P_4\lambda_{-4}$ و $P_4\lambda_{+4}$ باستخدام احتمالات الحالة في الجدول 7- 19، ومعدلات الانتقال الوحدوية المعطاة، والمعادلة (3.4)، أي أن

$$P_4\lambda_{+4} = 0.000392(0.49 + 0.49) + 0.000392(0.49 + 0.49) = 0.00076832$$

$$P_4\lambda_{-4} = 0.000392(0.01) + 0.000392(0.01) = 0.000784$$

الحالة 3 : *C3* > 50 MW

$$P_3 = P_3 + P_4 = 0.020392$$

$$F_3 = F_4 + P_3\lambda_{+3} - P_3\lambda_{-3}$$

$$= 0.00077224 + 0.00979608 - 0.00038808 = 0.01018024 \text{/ اليوم}$$

الحالة 2 : C2>25MW

$$P_2 = P_2 + P_3 = 0.058808$$

$$F_2 = F_3 + P_2\lambda_{+2} - P_3\lambda_{-2} = 0.02823576 \text{ / اليوم}$$

الحالة 1 : C1 > 0 MW

$$P_1 = P_1 + P_2 = 1.000000$$

$$F_1 = F_2 + P_1\lambda_{+1} - P_1\lambda_{-1} = 0$$

هذه القيمُتم عرضها في الجدول 7-21.

يمكن استخدام نموذج نظام التوليد الموضح في الجدول 7-21 مباشرةً كمؤشر على كفاية قدرة توليد النظام. عند استخدامه بهذه الطريقة، يُعرف هذا النهج باسم "طريقة فقدان السعة ". يحتوي الجدول 7-21 على كلٍ من الاحتمالية التراكمية وقيم التكرار عند كل مستوى من مستويات السعة ، ويمكن اعتباره نموذجًا كاملاً لسعة النظام. لا يتضمن جدول احتمالية انقطاع القدرة التقليدي، المستخدم في نهج فقدان الطاقة LOLE، ولا يتضمن أي معالم التردد frequency parameters ، ويُعطى بالقيم الموجودة على يسار الخط المتقطع في الجدول7-21.

يؤدي حذف جانب التردد إلى تبسيط تطوير نموذج سعة النظام، ولكن مع ما يترتب على ذلك من فقدان بعض الدلالة الفيزيائية لنموذج مستويات السعة model capacity levels.

الجدول 7-21 نموذج نظام التوليد.

رقم الحالة State No.	السعة خارج الخدمة Capacity out (MW)	الإحتمالية التراكمية Cumulative probability P_k	التردد التراكمي تردد/ اليوم Cumulative frequency/day F_k
1	0	1.000000	0.0
2	25	0.058808	0.02823576
3	50	0.020392	0.01018024
4	75	0.000792	0.00077224
5	100	0.000008	0.00001176

الفصل 8

تقييم وثوقية المنظومات المترابطة

Composite systems Reliability evaluation

1-8 مقدمة

في تقييم وثوقية نظام الطاقة الرئيسي (التوليد والنقل)، يُستخدم نوعان من التحليلات اعتمادًا على نطاق الدراسة والغرض منها: يُستخدم تحليل النظام المركب لإجراء دراسة تفصيلية لنظام أو جزء منه، بينما تشمل دراسة المناطق المتعددة عادةً نظامًا أكبر بكثير من المرافق أو مناطق التحكم المترابطة. يهتم تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب بالمشكلة الكاملة لتقييم قدرة نظام التوليد والنقل على توفير طاقة كهربائية كافية ومناسبة لمراكز الأحمال الرئيسية في النظام. في حين أن قيود النقل تُؤخذ في الاعتبار بشكل غير مباشر فقط في تقييم موثوقية المناطق المتعددة، فإن قيود النقل الداخلية تُنمذج بشكل مباشر في موثوقية نظام الطاقة المركب. يمكن أن تساعد دراسات الموثوقية هذه في تحسين تمثيل تأثيرات التوليد في تحليل موثوقية نظام النقل، وتحسين الاستثمارات النسبية في أنظمة التوليد والنقل، بما في ذلك التوليد الموزع.

تجدر الإشارة إلى أن دراسات وثوقية الأنظمة متعددة المناطق والأنظمة المركبة تتشابه في جوانب عديدة، حيث تتضمن كل منهما عقدًا متعددة. ويكمن الاختلاف الرئيسي في نمذجة شبكة النقل، فبسبب نموذج الشبكة الأكثر تفصيلًا، يحتوي نموذج وثوقية النظام المركب على عدد أكبر بكثير من العقد مقارنةً بنموذج الأنظمة متعددة المناطق. بالإضافة إلى ذلك، قد يختلف نوع نماذج تدفق الشبكة المستخدمة في هذه الدراسات. يُعتبر نموذج تدفق الشبكة (من نوع النقل) وطرق تدفق التيار المستمر مناسبة لتقييم وثوقية الأنظمة متعددة المناطق، بينما تُعتبر طرق تدفق التيار المستمر أو تدفق التيار المتردد أكثر ملاءمة لتقييم وثوقية الأنظمة المركبة.

يمكن أن تكون أساليب تقييم وثوقية الأنظمة المركبة حتمية أو احتمالية. يتمثل المبدأ الأساسي في الأساليب الحتمية في الحفاظ على خدمة كافية في ظل الانقطاعات الأكثر احتمالاً، مع قبول بعض التدهور في الأداء في ظل الانقطاعات ذات الاحتمالية المنخفضة التي تشمل عدة مرافق توليد ونقل. أما الأساليب الاحتمالية، فتُصمّم العوامل المؤثرة على الموثوقية بشكل أكثر شمولاً، وقد تكون تحليلية، أو محاكاة مونت كارلو Monte Carlo simulation ، أو هجينة hybrid.

2-8 نماذج المكونات Component Models

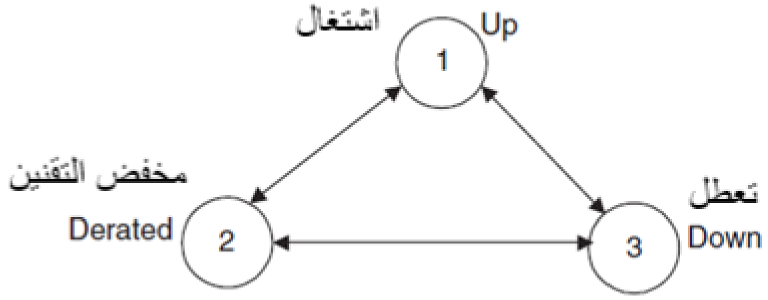
لإجراء تحليل موثوقية أي نظام، يجب تحديد نماذج المكونات بدقة. تُؤخذ المكونات التالية في الاعتبار عند تقييم موثوقية النظام المركب:

- وحدات التوليد
- خطوط النقل
- المحولات
- قضبان التوزيع
- قواطع الدائرة

بالإضافة إلى ذلك، يُعدّ الطقس عنصرًا هامًا في هذا التحليل، ويجب تحديد حالات الفشل الشائعة لمجموعات المكونات.

1-2-8 نماذج وحدات التوليد

عادةً ما تُنمذج المولدات كأجهزة ثنائية أو ثلاثية الحالة. يوضح الشكل 8-1 مخطط انتقال الحالة لمولد ثلاثي الحالة. تُمثل الحالات المختلفة كما يلي:



الشكل8 -1: نموذج ثلاثي الحالات للمولد.

- الحالة 1: حالة التشغيل بكامل الطاقة
- الحالة 3: حالة الإيقاف بطاقة تساوي صفر
- الحالة 2: حالة مُخفّضة الطاقة، تمثل متوسطًا مرجحًا لحالات الطاقة الجزئية.

يُعد نموذج الحالتين حالة خاصة من هذا النموذج، حيث لا يوجد انتقال إلى الحالة 2.

2-2-8 خطوط النقل

يُفترض أن تكون خطوط النقل إما في حالة التشغيل أو في حالة التعطل. كما يُفترض أن معدلات التعطل والإصلاح تعتمد على الأحوال الجوية. يوضح الشكل 8-2 مخطط انتقال حالة خط النقل، حيث:

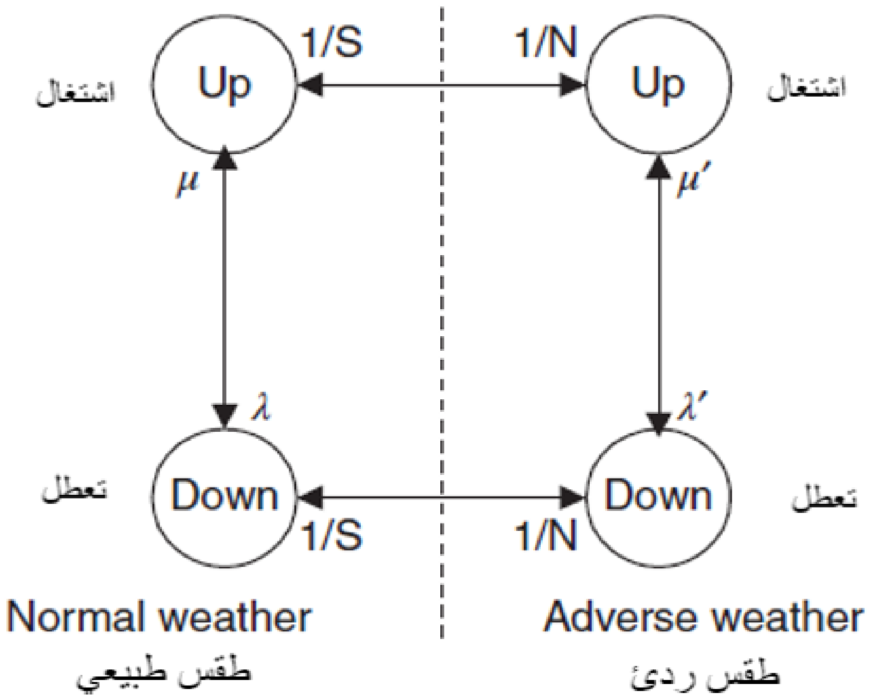
λ = معدل التعطل في الأحوال الجوية العادية

λ' = معدل التعطل في الأحوال الجوية السيئة

μ = معدل الإصلاح في الأحوال الجوية العادية

μ' = معدل الإصلاح في الأحوال الجوية السيئة

N, S = متوسط مدة الأحوال الجوية العادية والسيئة



الشكل8 -2: نموذج خط النقل المعتمد على الطقس.

على الرغم من أن الطقس قد يتواجد في عدة حالات، إلا أنه يُفترض عادةً أنه إما في الحالة الطبيعية أو الحالة السيئة. ومن المسائل المهمة المتعلقة بالطقس مدى تغطية المنطقة. فعندما يكون النظام ممتدًا على مساحة واسعة، قد تشهد المناطق المختلفة حالات جوية مختلفة في أي وقت. ويصعب معالجة هذا التأثير بدقة، ويلزم تبسيط بعض الأمور. أحد الأساليب هو تقسيم المنطقة بأكملها إلى مناطق. ويُحدد الطقس في

كل منطقة بمتوسط مدة الحالات الطبيعية والسيئة. ويُفترض أن تغيرات الطقس في المناطق المختلفة مستقلة. يُخصص كل خط لمنطقة معينة مما يعني فعليًا أن هذا الخط يتأثر بشكل أساسي بالطقس في هذه المنطقة. تجدر الإشارة إلى أنه بالنسبة لخطوط النقل المتوازية، فإن استخدام معدل الفشل فقط، وهو متوسط معدلات الطقس الطبيعي والسيئ، قد يؤدي إلى خطأ (سينغ وبيلينتون، 1977).

8-2-3 المحولات وقضبان التوزيع

على غرار خطوط النقل، تُعامل المحولات وقضبان التوزيع كأجهزة ثنائية الحالة، ولكن معدلات الأعطال ومعدلات الإصلاح تُفترض مستقلة عن الأحوال الجوية أي ليس للأحوال الجوية تأثير عليها .

8-2-4 قواطع الدائرة

يمكن أن يتعرض قاطع الدائرة لعدة أعطال كما هو موضح أدناه.

1. عطل أرضي: يشير هذا إلى عطل في قاطع الدائرة نفسه. في هذا النوع من الأعطال، يُعامل قاطع الدائرة بنفس طريقة معاملة المحول أو ناقل التوزيع.

2. عدم الفتح: يهدف قاطع الدائرة إلى عزل المكون المعطل. بسبب أعطال كامنة أو خفية في القاطع أو نظام الحماية المرتبط به، قد لا يفتح القاطع عند الحاجة.

قد يؤدي هذا إلى عزل مكونات سليمة نتيجةً لعمل حماية المنطقة الثانوية. يتميز نمط الفشل هذا عادةً باحتمالية p في نمذجة الموثوقية.

وهذا يعني عندما يتلقى هذا القاطع أمرًا بالفتح، هناك احتمال (p) ألا يستجيب. قد يعود ذلك إما إلى مشكلة في القاطع نفسه أو في نظام الحماية المرتبط به.

3. الفصل غير المرغوب فيه: من الممكن أيضًا أن يفتح القاطع دون أمر أو عطل. يمكن وصف ذلك بأنه معدل، وسيكون تأثيره انقطاعًا في الخط.

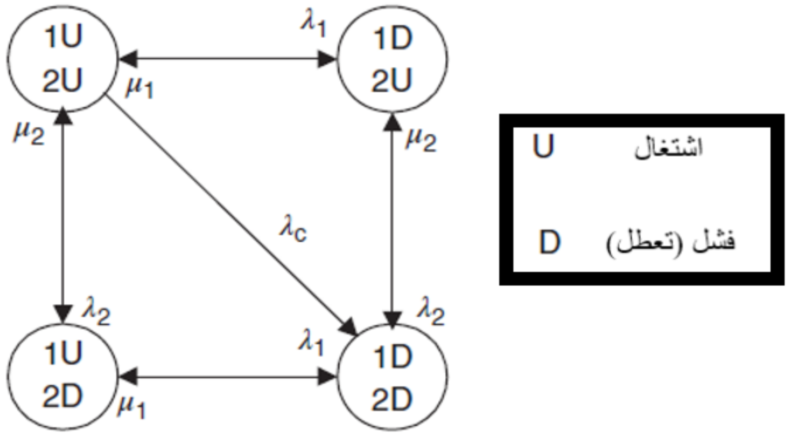
8-2-5 أعطال الوضع المشترك Common Mode Failures

يُعرف انقطاع الوضع المشترك بأنه حدثٌ تتكرر فيه عدة انقطاعات بسبب سبب خارجي واحد. مثال على ذلك هو تعطل برج نقل يدعم دائرتين. على الرغم من اقتراح العديد من نماذج انقطاع الوضع المشترك، إليكم نموذجًا بسيطًا لانقطاع الوضع المشترك لمكونين كما يلي: λi و μi هما معدلا تعطل وإصلاح المكون i، و λc هو معدل عطل الوضع المشترك.

3-8 طرق تحليلية لتقييم وثوقية الأنظمة المركبة

Analytical Methods for Composite System Reliability

تتضمن أي عملية تقييم وثوقية ثلاثة جوانب: تحديد الحالة، وتقييم الحالة بما يتوافق مع الأهداف، وتجميعها في مؤشرات. تعتمد الطرق التحليلية بشكل مباشر أو غير مباشر على نوع من نهج تعداد الاحتمالات. يرد أدناه وصف لنهج التعداد المباشر، وهو موضح في الشكل8-3. مع ذلك، لا يمكن إجراء تعداد شامل إلا لعدد قليل من المكونات، حيث يزداد عدد الاحتمالات بشكل أُسّي مع عدد المكونات. يمكن إدخال العديد من التحسينات على نهج التعداد الأساسي هذا لرفع كفاءته. وفيما يلي بعض الأمثلة:



الشكل 8-3: تمثيل لفشل الوضع المشترك.

1. تصنيف واختيار حالات الطوارئ. تتكون هذه العملية من الخطوتين التاليتين:

(أ) تصنيف انقطاعات الفروع و/أو المولدات في حالات التحميل الزائد ومشاكل الفولتية باستخدام مؤشر الأداء (PI). وسيتم مناقشة هذه العملية بإيجاز لاحقًا.

(ب) اختيار حالات الطوارئ من القائمة المصنفة باستخدام احتمالية الحدث أو حد عمق الحدث.

2. اقتطاع فضاء الحالة. في هذا النهج، تُؤخذ حالات الطوارئ من رتبة معينة فقط في الاعتبار. على سبيل المثال، يمكن النظر فقط في حالات الطوارئ حتى الرتبة الثانية.

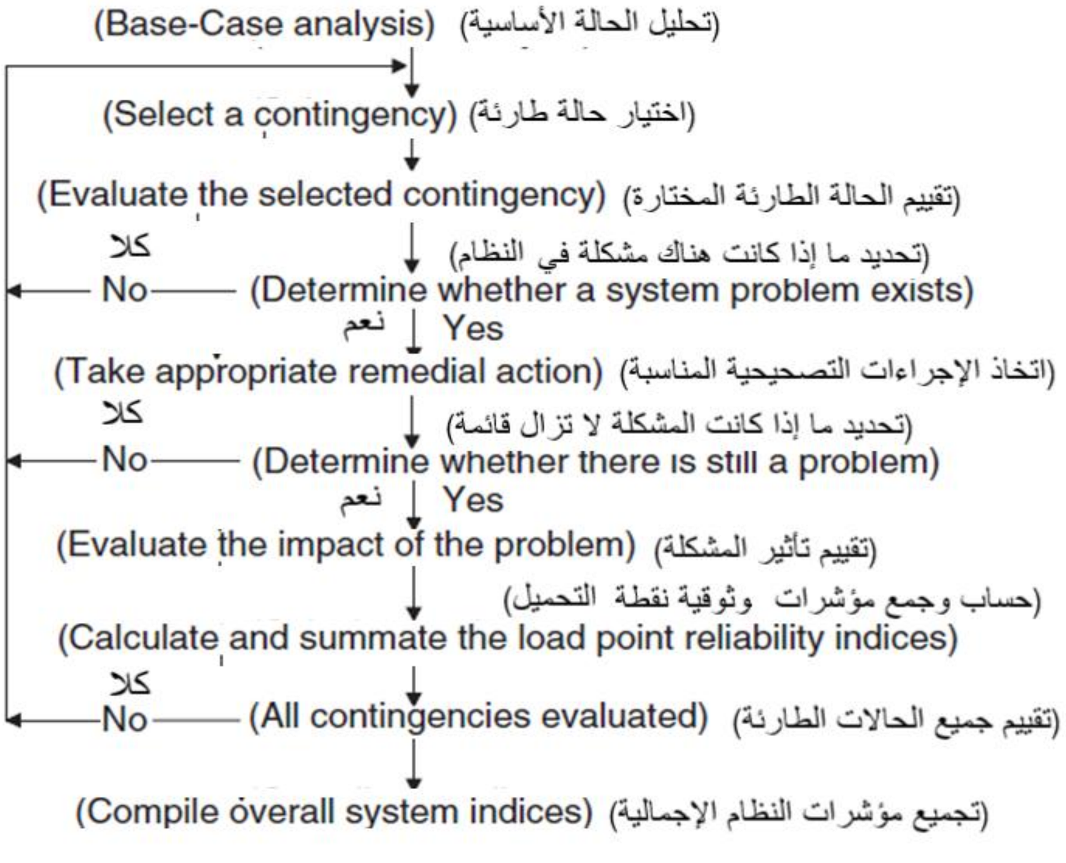
3. التعداد الضمني القائم على تماسك موثوقية النظام. إذا تم تحديد حالة ما على أنها حالة فشل، فإن جميع الحالات الناتجة عن هذه الحالة بسبب تدهور المكونات هي أيضًا حالات فشل.

يُعد استخدام مجموعات القطع الصغرى Minimal Cut Sets تطبيقًا عمليًا لهذا المبدأ.

4. تقليم فضاء الحالة State space باستخدام تفكيك فضاء الحالة. تفكيك فضاء الحالة هو أسلوب لتصنيف فضاء الحالة بشكل متكرر إلى مجموعات متماسكة من الحالات الوظيفية وحالات الفشل حتى يتم تصنيف جميع الحالات المهمة.

تكمن فائدة هذا الأسلوب في أنه يتعامل مع مجموعات من الحالات بدلًا من الحالات الفردية. ويمكن تحسين كفاءته باستخدام أسلوب التقليم، الذي يُزيل بسرعة أجزاءً كبيرة من الحالات الوظيفية قبل التفكيك، مما يُقلل وقت وجهد الحساب .

5. مناطق الفشل غير المتداخلة. تقتصر حالات الانقطاع ذات الرتبة الأعلى على الدوائر الموجودة في نفس الجوار الكهربائي، مما يُقلل بشكل كبير من عدد حالات الطوارئ التي يجب فحصها.



الشكل 8-4: مخطط تعداد الحالات الطارئة.

8-3-1 أساليب حل الشبكة Network Solution Methods

يُعدّ تقييم حالة الشبكة أحد الاختلافات بين تقييم وثوقية نظام الطاقة الكهربائية وبعض الشبكات الأخرى، حيث إنّ تقييم الحالة ليس بالأمر البسيط، ويتطلّب استخدام أساليب تدفق الشبكة Flow methods . وفيما يلي وصفٌ لأنواع أساليب الحل الثلاثة المستخدمة.

8-3-1-1 نموذج تدفق الشبكة الخطية Linear Network Flow Model

يُعرف هذا النموذج أيضًا بنموذج النقل (تقرير EPRI رقم EL-5178، 1987)، وهو يعتمد فقط على قانون كيرشوف الأول. في هذا النموذج، يساوي مجموع تدفقات الطاقة الفعالة الداخلة إلى كل ناقل أو الخارجة منه صافي الطاقة المُحقونة عند ذلك الناقل.

$$\bar{A}F + G = D \qquad (8.1)$$

حيث

A^{-} = مصفوفة وقوع العقد والفروع

F = متجه تدفق الدائرة

G = متجه التوليد

D = متجه الطلب

القيود هي

$$G \le G^{\max}$$
$$F \le F^{f}$$
$$-F \le F^{r}$$

حيث

Gmax = متجه أقصى توليد متاح

Ff، Fr = متجهات سعة الفروع الأمامية والعكسية

على الرغم من أن هذا النموذج يُعتبر عموماً مناسباً لتحليل وثوقية الأنظمة متعددة المناطق وقد تم استخدامه في بعض البرامج التجارية، إلا أنه لا يُعتبر دقيقاً بما فيه الكفاية بالنسبة لوثوقية الأنظمة المركبة.

8-3-1-2 نموذج تدفق الحمل للتيار المستمر أو نموذج تدفق القدرة الخطي

DC Load Flow or Linearized Power Flow Model

يُعبَّر عن هذا النموذج عادةً بالمعادلة التالية

$$B\theta + G = D \qquad (8.2)$$

حيث تكون المصفوفة B بحيث يكون

bij = العنصر ij من المصفوفة B

= { –(الموصلية بين العقدتين i و j) إذا كانت $i \neq j$
مجموع الموصليات المتصلة بالعقدة i إذا كانت $i = j$ }

θ = متجه زاوية جهد العقدة

و G و D هما متجهي التوليد والطلب كما في السابق.

يُعطى تدفق الخط من العقدة i إلى العقدة j بالعلاقة التالية:

$$f_{ij} = (\theta_j - \theta_i) b_{ij} \qquad (8.3)$$

القيود هنا هي:

$G \leq Gmax$

$F \leq Ff$

$F \leq Fr–$

حيث:

F = متجه التدفقات fij

Gmax = متجه أقصى توليد متاح

Ff، Fr = متجهات سعة الفروع الأمامية والعكسية

يُعتبر نموذج تدفق الطاقة بالتيار المستمر عمومًا حلاً وسطًا معقولًا بين التكلفة الحسابيةوالدقة في دراسات التخطيط. ويُستخدم هذا النموذج غالبًا في المناطق التي تتميز بشبكات معقدة ولا تعاني من مشاكل في الجهد.

في السنوات الأخيرة، تجدد الاهتمام بتطوير ونشر أجهزة التحكم في تدفق الطاقة كجزء من بنية "الشبكة الذكية". تشمل هذه الأجهزة خطوط التيار المستمر عالية الجهد (HVDC)،ووصلات التيار المتردد-المستمر-المتردد المتصلة مباشرة، ووحدات التحكم الموحدة في تدفق الطاقة (UPFCs)، بالإضافة إلى

بعض التقنيات الأخرى التي تتيح تحكمًا أكبر في تدفق الطاقة عبر خطوط محددة بشكل مستقل عن معاوقات هذه الخطوط. بينما تختلف النماذج التفصيلية لهذه الخطوط الخاضعة للتحكم في درجة تعقيدها، يمكن تمثيل نماذج تدفق الطاقة الخطية بشكل كافٍ باستخدام نموذج تدفق الشبكة (1)، لأن التدفقات على هذه الخطوط لم تعد تعتمد على معاوقاتها. وبالتالي، بالنسبة لهذه الأنظمة، يمكن تمثيل نماذج تدفق الطاقة الخطية كما يلي.

(8.4)

حيث

A^{-}= مصفوفة وقوع العقد والفروع للخطوط القابلة للتحكم فقط

Fcont = متجه تدفقات الطاقة الحقيقية على الخطوط القابلة للتحكم.

3-1-3-8 نموذج تدفق القدرة المتناوبة AC Power Flow Model

يتناول نموذج تدفق الطاقة المترددة جوانب تدفق الطاقة الفعالة وغير الفعالة. بالإضافة إلى حدود توليد الطاقة الفعالة للمولدات، توجد حدود للطاقة غير الفعالة وقيود على الجهد عند نقاط التوصيل.

2-3-8 الإجراءات التصحيحية

تُفعّل الإجراءات التصحيحية بعد استنفاد جميع الضوابط الآلية كجزء من حل الشبكة.

الخطوات:

• تحديد قيود التشغيل الفاشلة: أحمال زائدة على الخطوط، جهد منخفض/مرتفع على الحافلات، تجاوزات القدرة التفاعلية للمولدات،

تجاوزات في إنتاج الطاقة، تجاوزات في تصدير الطاقة الصافية للمنطقة (ميغاواط).

• استخدام البرمجة الخطية لتحديد الإجراء التصحيحي الأمثل.

وضع التيار المستمر**DC Mode** :

• ضبط مُبدِّل الطور

• إعادة توزيع الطاقة المُولَّدة

• خفض الأحمال القابلة للانقطاع

• فصل الأحمال الحرجة

وضع التيار المتناوب **AC Mode** :

- ضبط توليد الطاقة (ميغاواط MW وميغا فولت أمبير تفاعليMVAR)
- ضبط جهد ناقل التوليد
- ضبط مُبدِّل الطور
- ضبط مُحول الجهد للمُحَوِّل
- المكثف/المفاعل المُبدَّل
- خفض الأحمال

3-3-8 تصنيف واختيار حالات الطوارئ Contingency Ranking and Selection

يُعدّ تصنيف واختيار حالات الطوارئ إحدى التقنيات المستخدمة في برنامج طوّره معهد أبحاث الطاقة الكهربائية. يهدف اختيار حالات الطوارئ إلى تحديد المجموعة الفرعية التي ستؤدي إلى تعطل النظام من بين مجموعة جميع حالات الطوارئ المحتملة. لا يمكن لأي طريقة لاختيار حالات الطوارئ أن تحقق هذا الهدف بشكل كامل؛ بل قد تُوفّر في أفضل الأحوال مجموعة فرعية تحتوي على معظم حالات الطوارئ التي تُسبّب تعطل النظام.

أحد الأساليب الممكنة هو ترتيب حالات الطوارئ بحل كل حالة طوارئ باستخدام تدفق الحمل المستمر لكن هذا الأسلوب سيستغرق وقتًا طويلاً. في طريقة أسرع ولكن أقل دقة، تُرتَّب حالات الطوارئ تقريبًا حسب شدتها بناءً على مؤشر الأداء (PI). تُعرَّف الدالة العددية، المسماة PI، أولًا لتوفير مقياس لإجهاد النظام. ثم تُستخدم تقنية مناسبة للتنبؤ بتغير مؤشر الأداء (ΔPI)، أي التغير في مؤشر الأداء عند تعطل أحد المكونات. تُستخدم قيم ΔPI لحالات الطوارئ لترتيبها حسب شدتها. ثم تُستخدم تدفقات الحمل المتردد أو المستمر لتحديد أي من حالات الطوارئ المصنفة هذه تُسبب مشاكل بالفعل.

عندما لا يؤدي عدد محدد من حالات الطوارئ المتتالية إلى فشل النظام، يتم إيقاف العملية. الافتراض هنا هو أن حالات الطوارئ المتبقية ذات التصنيف الأدنى لن تتسبب أيضًا في فشل النظام. هذه ليست طريقة مضمونة لتصنيف حالات الطوارئ. من الممكن أن يتم استبعاد بعض حالات الطوارئ الخطيرة، وأن يتم تصنيف بعض حالات الطوارئ الأقل خطورة. يمكن تصنيف حالات الطوارئ بناءً على مشاكل الحمل الزائد أو مشاكل الجهد. يُقدم هنا نقاش موجز حول تصنيف حالات الطوارئ بناءً على حالات الحمل الزائد.

تم وصف مؤشر الأداء المستخدم لهذا الغرض في تقرير EPRI رقم EL-2526 (1982).

$$PI = \sum_{\ell} W_{\ell} \left(\frac{P_{\ell}}{\overline{P}_{\ell}} \right)^{n} \qquad (8.5)$$

حيث:

Wℓ = عامل ترجيح الدائرة ℓ

Pℓ = تدفق القدرة الحقيقية في الدائرة ℓ

Pℓ = القدرة المقدرة للدائرة ℓ

n = عدد زوجي، عادةً 2

تم اقتراح عدة طرق لإيجاد ΔPI. يمكن لـ PI عمومًا أن يوفر مقياسًا جيدًا لإجهاد النظام. في الحالات التي يزداد فيها الحمل في فرع واحد بينما ينخفض في الفروع الأخرى، قد يفشل PI في التعرف على الأحمال الزائدة، مما يؤدي إلى ظاهرة التغطية. يمكن تقليل التغطية بزيادة الأس n، ولكن يصبح من الصعب حساب ΔPI عندما يكون n^2.

8-3-3-1 مؤشر الأداء (PI) لانقطاعات المولدات PI for Generator Outages

يتم تصنيف انقطاعات المولدات بناءً على التنبؤ بالأحمال الزائدة الناتجة عنها. مؤشر الأداء المستخدم هو

نفس مؤشر الأداء المستخدم للخطوط. يتم تقدير التغير في مؤشر الأداء الناتج عن تغير في Pi، وهو حقن الطاقة عند الناقل رقم *i*،

بواسطة

$$\Delta PI = \frac{\partial PI}{\partial P_i} \Delta P_i \qquad (8.6)$$

وقد وُجد أن هذا النموذج التنبؤي الخطي يُنتج تصنيفات جيدة نسبياً لانقطاعات وحدات التوليد. يُعرض أدناه تطبيقٌ باستخدام تدفق الطاقة بالتيار المستمر.

$$\frac{\partial PI}{\partial P_i} = n\hat{\theta}_i \qquad (8.7)$$

حيث

$\hat{\theta}_i$ = العنصر i من المتجه $\hat{\boldsymbol{\theta}}$

N = عدد الحافلات

$\boldsymbol{\theta}$ = B−1P̂

B = مصفوفة قابلية النظام N × N (كما هو موضح في القسم 3.1.2)

$\hat{P}$ = متجه طوله N يتم إنشاؤه بإضافة حقن $\hat{P}\ell$ على حافلة البداية و $-\hat{P}\ell$ على حافلة النهاية لكل دائرة ℓ حيث

$$\hat{P}_{\ell} = \frac{W_{\ell} B_{\ell}^{n} \theta_{\ell}^{n-1}}{\bar{P}_{\ell}^{n}} \tag{8.8}$$

بمعنى آخر، $\hat{P}$ هو مجموع متجهات ℓ، يحتوي كل منها على $\hat{P}\ell$ على ناقل البداية و $-\hat{P}\ell$ على ناقل النهاية للدائرة ℓ، و 0 عند جميع النواقل الأخرى. في المعادلة (6)، $\theta\ell$ يرمز إلى فرق الزاوية بين ناقل البداية وناقل النهاية للدائرة ℓ. بعد حساب تدفق التيار المستمر في الحالة الأساسية، تصبح عناصر B وقيم $\theta\ell$ متوفرة. يلزم إجراء حساب إضافي واحد لإيجاد $\hat{\theta}$.

8-3-3-2 اختيار خطة الطوارئ بناءً على انحرافات الفولتية

Contingency Selection Based on Voltage Deviations

عند انقطاع التيار الكهربائي، يساهم عاملان في انخفاض الجهد: فقدان شحن الدائرة المنقطعة، وزيادة استهلاك الطاقة (فار) في الدوائر التي زاد حملها نتيجةً لهذا الانقطاع. إحدى أبسط طرق حل مشكلة PI هي:

$$\mathrm{PI} = \sum_{\ell} X_{\ell} P_{\ell}^{2} \tag{8.9}$$

حيث

$X\ell$ = مفاعلة الدائرة ℓ

المعالج التناسبي التكاملي الذي حقق نجاحًا أكبر هو:

$$\mathrm{PI} = \sum_{\ell} X_{\ell} \left(\frac{1}{P_{oi}^{2}} + \frac{1}{P_{oj}^{2}} \right)^{0.25} P_{\ell}^{2} \tag{8.10}$$

حيث

$X\ell$ = مفاعلة الدائرة ℓ

$P\ell$ = تدفق القدرة في الدائرة ℓ

i, j = نقاط الانطلاق والوصول في الدائرة ℓ

Poi, Poj = مصطلحات تُشير إلى شحن الخط و/أو مصادر القدرة التفاعلية والأحمال على نقاط الانطلاق i و j.

3-3-3-8 تقييم الطوارئ Contingency Evaluation

يتم تقييم الطوارئ بترتيب تنازلي حسب شدتها. لكل طوارئ من الدرجة الأولى، يتم أيضًا ترتيب وتقييم الطوارئ الثانوية. يتوقف التقييم إما عند بلوغ عدد محدد مسبقًا من حالات النجاح، أو إذا كان احتمال حدوث الطوارئ أقل من عتبة معينة.

4-8 محاكاة مونت كارلو Monte Carlo Simulation

تُعدّ محاكاة مونت كارلو إحدى الطرق المقبولة لتقييم موثوقية أنظمة الطاقة المركبة. وتسعى هذه المحاكاة إلى التغلب على مشكلة أبعاد فضاء الحالة من خلال أخذ العينات. وتُقدّر مؤشرات الموثوقية عن طريق محاكاة العملية الفعلية والسلوك العشوائي للنظام. وتنقسم المحاكاة إلى فئتين رئيسيتين:
أخذ العينات العشوائي أو المحاكاة غير المتسلسلة، والمحاكاة المتسلسلة. وعادةً ما تكون المحاكاة المتسلسلة أبطأ في التقارب من أخذ العينات العشوائي. وإذا لم تكن مؤشرات التردد والمدة ذات أهمية، فإن أخذ العينات العشوائي يتطلب بيانات أقل من المحاكاة المتسلسلة. ومع ذلك، تُعدّ المحاكاة المتسلسلة مناسبة لدراسة الأحداث المرتبطة زمنيًا، وهي عمومًا أكثر فعالية، خاصةً عند وجود أعطال مترابطة.

1-4-8 الفكرة الأساسية لأخذ العينات العشوائية

لنفترض

$$x = (x_1,\ x_2,\ \dots\ ,\ x_m) \qquad (8.11)$$

ليكن X نظام طاقة ذو حالة حيث:

x_i = حالة المكون i

X = مجموعة جميع الحالات الممكنة x

P(x) = احتمال الحالة x

لنفترض أن:

F(x) = اختبار يُطبق للتحقق مما إذا كانت الحالة x قادرة على تلبية الحمل.

القيمة المتوقعة لـ $F(x)$

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x)P(x) \qquad (8.12)$$

لكي تكون E(F) احتمال فقدان الحمل، فإن:

$$F(x) = \begin{cases} 1 & \text{إذا تقليص الحمل في الحالة } x \\ 0 & \text{خلاف ذلك} \end{cases}$$

الآن، ستكون $E(F)$ هي القيمة الحقيقية لاحتمالية فقدان الحمل، حيث يتم حسابها باستخدام فضاء الحالة X بأكمله. في أخذ العينات العشوائية، يتم اختيار $x \in X$ من توزيعاتها المشتركة، ثم يتم تقدير $E(F)$ باستخدام

$$E(F) = \frac{1}{NS}\sum_{i=1}^{NS} F(x^i) \qquad (8.13)$$

حيث

NS = عدد العينات

x^i = القيمة المأخوذة من العينة رقم i

$F(x^i)$ = نتيجة الاختبار للقيمة المأخوذة من العينة رقم i

يمكن حساب تباين التقدير كما يلي:

$$V(\hat{E}(F)) = \frac{V(F)}{NS} \qquad (8.14)$$

بما أن V(F) غير معروفة، يمكن استخدام تقديرها:

$$\hat{V}(F) = \frac{1}{NS}\sum_{i=1}^{NS} F((x^i - \hat{E}(F))^2 \qquad (8.15)$$

كما سيتم شرحه لاحقاً، يُستخدم تباين التقدير لحساب معامل التباين الذي يمكن استخدامه لاختبار تقارب المحاكاة.

8-4-2 خوارزمية أخذ العينات

يمكن صياغة خوارزمية أخذ عينات الحالة على النحو التالي:

1). تعيين عدد العينات NS = 0

2). NS = NS + 1، واختيار الحالة $xi \in X$ عن طريق أخذ عينة من التوزيع الاحتمالي P(x)، والذي سيتم شرحه لاحقًا.

3). حساب F(xi).

4). تقدير Ê(F).

5). حساب هامش الخطأ في التقدير، والذي سيتم شرحه لاحقًا.

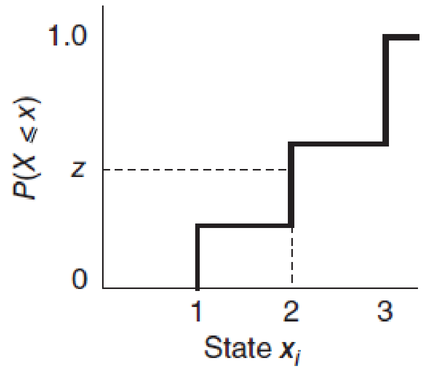
6). إذا كان هامش الخطأ مقبولًا، توقف، وإلا فارجع إلى الخطوة 2).

8-4-2-1 اختيار حالة النظام (الخطوة 2 في الخوارزمية)

بافتراض استقلالية المكونات، يمكن أخذ عينة من حالة النظام عن طريق أخذ عينات من حالات المكونات. يُستخدم مبدأ التوزيع النسبي، أي أن الحالات تُؤخذ عينات منها بما يتناسب مع احتماليتها. تُؤخذ قيمة z من توزيع منتظم في الفترة [0 ، 1] باستخدام مولد أرقام شبه عشوائية مولد أرقام. يمكن إيجاد الحالة من توزيع الاحتمال التراكمي عن طريق مساواة

$$z = P(X \leq x_i) \qquad (8.16)$$

ويتم تحديد قيمة xi كما هو موضح في الشكل8-5.



الشكل 8-5 إيجاد قيمة المتغير.

8-4-2-2 التقارب (الخطوة 5)

يُعرَّف عدم اليقين عادةً باستخدام معامل التباين، لأنه يُعَيِّر الانحراف المعياري. يُعرَّف معامل تباين التقدير COV على النحو التالي:

COV = معامل التباين المُقَدِّر ويساوي

$$= \frac{\sqrt{V(\hat{E}(F))}}{\hat{E}(F)} \qquad (8.17)$$

حيث $V(E(F)) =$ تباين القيمة المقدرة لـ $E(F)$

$$\text{COV} = \frac{\sqrt{V(\hat{E}(F))}}{\hat{E}(F)} = \frac{\sqrt{V(F)}}{\sqrt{\text{NS}}\hat{E}(F)} \qquad (8.18)$$

من المعادلة (8.16) يمكننا الحصول على حجم العينة اللازم للوصول إلى مستوى معين من معامل التباين:

$$\text{NS} = \frac{V(F)}{(\text{COV} \cdot \hat{E}(F))^2} \qquad (8.19)$$

يمكن استخلاص بعض الاستنتاجات المهمة من المعادلة (8.18). يتضح أن حجم العينة لا يتأثر بحجم النظام أو تعقيده، بل بالدقة المطلوبة والاحتمالية المُقدَّرة. يعتمد الجهد الحسابي على حجم العينة (NS) ووقت وحدة المعالجة المركزية لكل عينة. وبالتالي، بالنسبة لمعامل تباين (COV) ومؤشر معينين على الرغم من أن عدد العينات مستقل عن حجم النظام، فإن وقت وحدة المعالجة المركزية ليس كذلك، حيث أن الوقت اللازم لتقييم الحالة في الأنظمة الأكبر حجمًا أعلى منه في الأنظمة الأصغر. يجب أيضًا التذكير بأن معظم وقت الحساب ناتج عن عملية تقييم الحالة. العامل الآخر الذي يؤثر على حجم العينة هو التباين. إذا كان التباين مرتفعًا، فإن حجم العينة يكون أكبر. وقد أدى ذلك إلى استخدام تقنيات تقليل التباين لتقليل وقت الحساب.

8-4-3 تقليل التباين لتحسين الكفاءة الحسابية

Variance Reduction for Computational Efficiency

توجد عدة طرق لتقليل التباين بهدف تقليل حجم العينة. اثنتان من هذه الطرق موصوفتان كلآتي :

- **طريقة المتغير الضابط Variance Reduction for Computational Efficiency**

ليكن Z متغيرًا عشوائيًا (rv) مرتبطًا ارتباطًا وثيقًا بـ F، ولنُعرّف

$$Y = F - \alpha(Z - E(Z))$$

ثم أن

$$E(Y) = E(F) \qquad (8.20)$$

$$V(Y) = V(F) + \alpha^2 V(Z) - 2\alpha C(F, Z) \qquad (8.21)$$

الآن إذا كان

$$2\alpha C(F, Z) > \alpha^2 V(Z)$$

فإن

$$V(Y) < V(F) \qquad (8.22)$$

حيث C(F, Z) هي التباين المشترك بين F و Z. وتشير المعادلة (8.21) إلى أنه إذا تم توجيه العملية للتقارب نحو Y بدلاً من Z، فإنها ستتقارب بشكل أسرع. لكن المعادلة (8.17) تضمن أن القيمة المتوسطة التي نحسبها من خلال Y ستكون هي قيمة Z. على سبيل المثال، Z يمكن أن تكون احتمالية فقدان الحمل (LOLP) الناتجة عن التوليد فقط، ويمكن حساب E(Z) بواسطة برنامج موثوقية التوليد الذي يتميز عادةً بالسرعة.

- **طريقة المتغيرات المتضادة Antithetic Variable Method**

يمكن شرح مفهوم المتغيرات المتضادة كما يلي:

ليكن

$$F_\alpha = 1/2(F' + F'') \qquad (8.23)$$

فاذا كان

$$E(F') = E(F'') = E(F)$$

عليه فان

$$E(F_\alpha) = E(F)$$

$$V(F_\alpha) = 1/4[V(F') + V(F'')] + 2C(F', F'') \qquad (8.24)$$

إذا كان هناك ارتباط سلبي بين F′ و F″، فإن C(F′, F″) > 0،

$$V(F_\alpha) < V(F) \qquad (8.25)$$

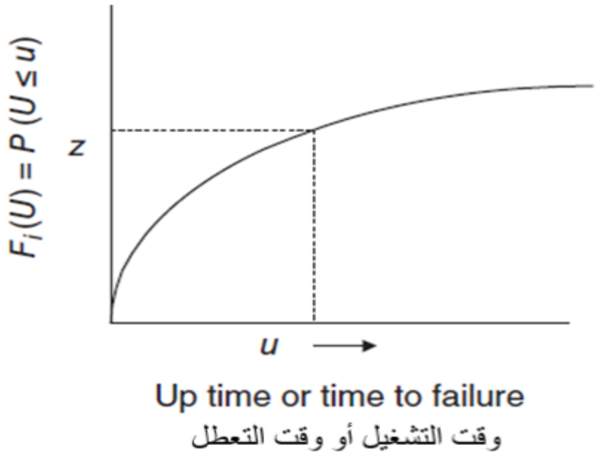
وللحصول على ارتباط سلبي، يتعين استخدام الأرقام العشوائية Zi لحساب E(F′) و (Zi – 1) ولحساب E(F″) أيضاً.

4-4-8 المحاكاة التسلسلية Sequential Simulation

في المحاكاة التسلسلية، تُولَّد حالات النظام بالتتابع عن طريق الانتقال من حالة إلى أخرى باستخدام توزيعات احتمالية لمدد حالات المكونات وأرقام عشوائية من [0 ، 1]. لنأخذ المكون i. لنفترض أن هذا المكون في حالة تشغيل وأن مدته معطاة بـ Ui (rv). إذا كان z رقمًا عشوائيًا في [0 ، 1]، فيمكن استنتاج مدة التشغيل باستخدام العلاقة :

$$\begin{aligned} z &= P(U_i \leq U) \\ &= F_i(U) \end{aligned} \qquad (8.26)$$

يُحدث المكون ذو أقل وقت انتقالًا ويتسبب في انتقال النظام. يتم تقييم الحالة بنفس طريقة أخذ العينات العشوائية (الشكل 10 -6).



الشكل 8 -6: إيجاد الوقت المناسب للانتقال.

يمكن صياغة الخوارزمية في الخطوات التالية:

لنفترض أن الانتقال رقم n قد حدث للتو عند الزمن t_n ، وأن زمن الانتقال التالي للمكون i يُعطى بـ T_i. بالتالي، فإن متجه أزمنة انتقالات المكونات يُعطى بـ $\{T_i\}$، وتتم المحاكاة في الخطوات التالية.

الخطوة 1. يُعطى الوقت اللازم للانتقال التالي للنظام بواسطة

$$T = \min \{T_i\} \quad (8.27)$$

إذا كان هذا T يُطابق T_p، أي المكون رقم p، فإن الانتقال التالي يحدث بتغيير حالة هذا المكون.

الخطوة 2: يتم الآن تقديم وقت المحاكاة

$$t_{n+1} = t_n + T \quad (8.28)$$

الخطوة 3. يتم حساب الأوقات المتبقية لانتقالات المكونات بواسطة

$$T_i^r = T_i - T \quad (8.29)$$

حيث T_i^r هو الوقت المتبقي لانتقال المكون i.

الخطوة 4: يصبح الوقت المتبقي للمكون p الذي تسبب في الانتقال صفرًا، ويتم تحديد الوقت اللازم لانتقاله التالي

T_p عن طريق سحب عدد عشوائي.

الخطوة 5: يتم تحديد الوقت Ti حيث

$$T_{i,i \neq p} = T_i^r \text{ and } T_{i,i=p} = T_p \quad (8.30)$$

الخطوة 6. من t_n إلى t_{n+1}، تبقى حالة المعدات ثابتة، وتُنفذ الخطوات التالية:

أ). يتم تحديث الحمل لكل عقدة إلى الساعة الحالية.

ب). إذا لم يحدث انقطاع في الحمل لأي عقدة، تنتقل المحاكاة إلى الساعة التالية؛ وإلا، يتم استدعاء وحدة تقييم الحالة.

ج). إذا تم استيفاء جميع الأحمال بعد اتخاذ الإجراءات التصحيحية، تنتقل المحاكاة إلى الساعة التالية. وإلا، تُحتسب هذه الساعة كساعة انقطاع في الحمل لتلك العقد والنظام. بالإضافة إلى ذلك، إذا لم يحدث انقطاع في الحمل في الساعة السابقة، تُحتسب هذه الساعة كحالة انقطاع في الحمل.

د). تُنفذ الخطوات من (أ) – إلى (ج) حتى قيمة t_{n+1}.

الخطوة 7: يتم تحديث الإحصائيات، وتنتقل العملية إلى الخطوة 2.

الخطوة 8: تستمر المحاكاة حتى يتم استيفاء معيار التقارب.

5-8 الاعتبارات السيبرانية الفيزيائية Cyber-Physical Considerations

في تقييم وثوقية أنظمة الطاقة المركبة، يُفترض عمومًا أن الجزء السيبراني، بما في ذلك الاتصالات والحماية، يتمتع بموثوقية تامة. وبالتالي، يُفترض أن تعطل أحد مكونات نقل التيار، مثل خط النقل، يؤدي إلى عزل ذلك المكون فقط. ومع ذلك، فقد تم إدراك أن الأعطال الخفية أو غير المكتشفة في نظام الحماية تُعد من الأسباب الشائعة لانقطاعات متعددة، أو ممتدة، أو متتالية .وقد تناولت دراسات عدة في هذه المجال إلى أن أنماط فشل نظام الحماية لها تأثير كبير على مؤشرات الوثوقية.وفي الوقت الحاضر تُجهّز لوحات الحماية الحديثة بأجهزة إلكترونية ذكية متعددة الوظائف متصلة بشبكات الاتصالات. وكما ورد في احدى الدراسات فإنه نظرًا لتنوع بنى أنظمة الحماية، فضلًا عن تنوع آليات التحكم والاتصال، يصعب نمذجة أنظمة الحماية ذات التكوينات التفصيلية بشكل صريح بالتزامن مع مكونات التيار الكهربائي. وقد حاول فلاحاتي، فو، وو (2012) وفلاحاتي و فو (2014) دراسة الترابطات المباشرة وغير المباشرة بين الأنظمة السيبرانية والفيزيائية، وقدموا بعض المصطلحات والعمليات الرياضية، واقترحوا تطبيقات على أنظمة اختبار صغيرة تتضمن ميزات المراقبة والتحكم والحماية .

توفر هذه المراجع معلومات قيّمة حول تأثير أعطال العناصر السيبرانية على مؤشرات وثوقية النظام المادي، لكنها لا تقدم طريقة عملية للتعامل مع الجوانب السيبرانية الفيزيائية لأنظمة الطاقة. يقترح كل من لي، وسينغ، وسبرينتسون (2014) ولي وسينغ (2015) منهجية أكثر منهجية وقابلية للتطوير للتحليل الشامل بطريقة عملية باستخدام مصفوفة واجهة التفاعل السيبراني الفيزيائي (CPIM). يوفر مفهوم CPIM طريقة لفصل التحليل السيبراني عن التقييم الشامل للموثوقية. في الواقع، يُجرى التحليل السيبراني خارج المحاكاة الرئيسية لتقييم النظام المركب، ثم تُربط نتائج التحليل من خلال CPIM. في دراسة لي، وسينغ، وسبرينتسون (2014) ودراسة لي وسينغ (2015)، تم تصميم وتحليل نظام حماية نموذجي لمحطة فرعية بهيكل مفصل كمثال لتوضيح إجراءات الحصول على CPIM. كما تم صياغة خطوات استخدام CPIM في تقييم وثوقية نظام الطاقة المركب.

6-8 دمج طاقة الرياح Integration of Wind Energy

في السنوات الأخيرة، ازداد التركيز بشكل ملحوظ على تركيب مصادر الطاقة المتجددة غير الكهرومائية في أنظمة الطاقة. ومن بين هذه المصادر، تُعد طاقة الرياح من أهم مصادر الطاقة المتجددة. وتعتمد الطاقة المولدة من الرياح على سرعة الرياح وتوافر توربينات الرياح، وبالتالي فإن إنتاج مزرعة الرياح متقطع ومصدر لعدم يقين كبير. ويمكن تحسين هذا الوضع من خلال تركيب كمية كبيرة من التخزين. وقد نُشرت العديد من الأبحاث حول منهجية النمذجة والمحاكاة لتقييم وثوقية أنظمة الطاقة المركبة التي

تتضمن دمج مزارع الرياح والتخزين. وهناك عدة عوامل يجب مراعاتها عند تقييم تأثير دمج مصادر الطاقة المتقطعة على وثوقية نظام الطاقة المركب.

8-6-1 العلاقة بين الحمل وإنتاج طاقة الرياح

Correlation between Load and Wind Energy Output

توجد علاقة ارتباطية بين طاقة الرياح والحمل، حيث يرتبط كلاهما بوقت اليوم والتغيرات الموسمية. وقد تم إدراك هذا التأثير (سينغ وغونزاليس،1985 ؛ سينغ وكيم، 1988) واقتُرحت نماذج مناسبة. وقد تم توسيع نطاق استخدام تقنيات التجميع لتقليل حجم النموذج (سينغ وكيم، 1988) لاحقًا (كيم وسينغ، 2012؛ كايل وأولين، 2012) وثبتت فعاليتها. وقد تبين (كيم وسينغ، 2012) أن تجاهل هذه العلاقة قد يؤدي إلى تقييم متفائل للوثوقية.

8-6-2 تأثير الدوامة Wake Effect

تكون سرعة الرياح الداخلة إلى التوربين أعلى من سرعتها الخارجة منه، لأن التوربينات تولد الكهرباء من الرياح الداخلة. في المنطقة الواقعة خلف التوربين، أي في الجانب المواجه للرياح، يحدث تدفق مضطرب، ويُطلق على فقدان الطاقة هذا اسم تأثير الدوامة. نتيجةً لهذا التأثير، تولد توربينات الرياح الواقعة في اتجاه الريح طاقة أقل من تلك الواقعة في اتجاه الريح. لتقييم واقعي لتأثير دمج توربينات الرياح، ينبغي مراعاة تأثير الدوامة؛ وإلا فسيكون تقييم الوثوقية متفائلاً للغاية. تمت مناقشة تضمين تأثير الدوامة وتأثيره على مؤشرات الوثوقية بتفصيل كبير في دراسة كيم، سينغ، وسبرينتسون (2012).

8-6-3 دمج أنظمة التخزين Integration of Storage

يتزايد الإدراك بأنه في حال دمج مصادر الطاقة المتقطعة واسعة النطاق في الشبكة الكهربائية، فإن تخزين الطاقة سيكون ضروريًا. فعلى سبيل المثال، تفرض ولاية كاليفورنيا في اميركا حدًا أدنى لتخزين الطاقة في البطاريات. ويجب أن يُؤخذ موقع التخزين وكميته ومستواه في الاعتبار عند وضع نماذج وثوقية أنظمة الطاقة المركبة (Xu and Singh, 2014; Mitra and Vallem, 2012).

7-8 . الاستنتاجات

قدّم هذا الفصل ملخصًا لأهداف وأساليب تقييم وثوقية الأنظمة المركبة. وقد استُخدمت هذه الأساليب في العديد من تطبيقات تخطيط أنظمة الطاقة، مثل: (1) تحديد اختناقات النقل في النظام قيد الدراسة، (2) تحديد الأولويات أو التحسين بين الاستثمارات في التوليد والنقل، (3) تقييم تأثير قيود النقل في تحليلات السوق الاقتصادية وسوق الطاقة، و(4) دراسات التخطيط المتعلقة بتكامل الموارد الموزعة والمتغيرة. في ممارسات تشغيل الشبكة الحديثة، حيث يتم تشغيل أصول التوليد والنقل بشكل متزايد بالقرب من حدودها القصوى، يتزايد دور تحليلات الأنظمة المركبة.

الفصل 9

تقييم وثوقية نظام النقل

1-9 مقدمة

يُعدّ نظام النقل، كجزء من نظام الطاقة، نظامًا متفرعًا واسعًا، طويلًا، يعمل في ظل ظروف جوية متغيرة، ويتأثر بالاضطرابات الجوية. لذا، من المهم دراسة وثوقيته في الظروف الجوية العادية والعاصفة.

عمومًا، تُستخدم الطرق التالية لتقييم وثوقية نظام النقل:

1. تقنية ماركوف Markov technique . (الطريقة الدقيقة).
2. طريقة التردد والمدة Frequency and duration method.
3. الطرق التقريبية.

تُعدّ تقنية ماركوف، القائمة على تقنية فضاء الحالة والعمليات العشوائية، طريقةً دقيقةً لتقييم وثوقية هذا النظام.أما طريقة التردد والمدة فهي أبسط وأسهل، حيث يُمكن من خلالها حساب تردد الانقطاع المتوقع و مدة الانقطاع عند أي نقطة في أي نظام نقل. المفهوم الأساسي لعملية ماركوف هي عملية عشوائية حيث تعتمد الحالة المستقبلية فقط على الحالة الحالية، وليس على التاريخ السابق. في دراسات الوثوقية، يتغير النظام عشوائيًا من حالة إلى أخرى بمعدلات انتقال محددة. وتُعدّ نماذج ماركوف مناسبة لحالات الفشل والإصلاح العشوائية وانتقالات الحالة المتسلسلة والأنظمة متعددة الحالات وتحليل الوثوقية المعتمد على الزمن وكذلك الأنظمة القابلة للإصلاح.

أما طريقة التردد والمدة فهي أيضاً إحدى الطرق الإحصائية المستخدمة لتقييم وثوقية شبكات النقل الكهربائية، وخصوصًا لتحليل الانقطاعات وتأثيرها على المستهلكين أو على مكونات الشبكة. أما مميزاتها فهي : بسيطة وسهلة التطبيق ، تعتمد على بيانات تشغيل حقيقية ، مناسبة للدراسات الأولية ، تستخدم بكثرة في شركات الكهرباء . إلا أن لها غيوب تكمن في : لا تمثل دائمًا سلوك الشبكة المعقد ، تهمل الترابط بين الأعطال أحيانًا ، تعتمد بشدة على جودة البيانات التاريخية .

الطرق التقريبية مثل طريقة نقاط الحمل (Load Point Method) وطريقة اختزال الشبكة وسوف

نركز على طريقة نقاط الأحمال بدل تحليل كل الشبكة وطريقة اختزال الشبكة في هذا الفصل .

2-9 معايير التحليل

يُؤخذ مفهومان أساسيان في الاعتبار عند تقييم وثوقية الشبكات:

- إنتهاك (انقطاع) الاستمرارية **Violation of continuity**
- إنتهاك الجودة **Violation of quality**

يفترض المعيار الأول أن الخطوط ذات سعة غير محدودة، بينما يأخذ المعيار الثاني في الحسبان تجاوز حدود الفولتية وتجاوز تصنيف الخط أو سعته. يُعرف المعيار الثاني عمومًا بتقييم الوثوقية المركب.
يُستخدم المعيار الأول على نطاق واسع حاليًا لتقييم وثوقية أنظمة النقل والتوزيع، ولذلك سنركز مبدئيًا على معيار الاستمرارية فقط.

3-9 معلمات المكونات ومؤشرات النظام Component parameters and system indices

يمكن تحليل الشبكة بطريقة مشابهة لتلك المستخدمة سابقًا لتقييم وثوقية سعة التوليد، أي يمكن تقييم احتمالية عدم استيفاء معيار الاستمرارية. وبمعرفة مؤشرات وثوقية المكونات المناسبة، يصبح من السهل نسبيًا حساب معدل الفشل المتوقع (λ)، ومتوسط مدة الانقطاع (r)، ووقت عدم التوفر أو وقت الانقطاع السنوي (U). وللقيام بذلك، لذا يتطلب معرفة قيم λ وr وU لكل مكون من مكونات النظام.

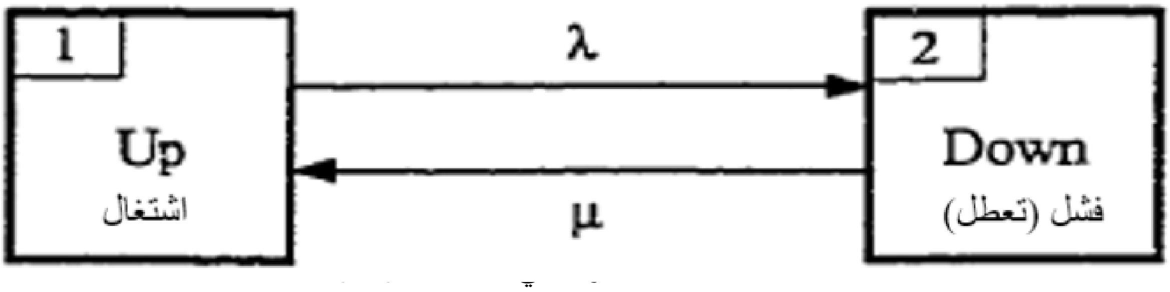
4-9 تقنية فضاء الحالة (نمذجة ماركوف) State space technique (Markov modelling)

حالات ماركوف في أنظمة النقل

يحتوي مُكوّن النقل عمومًا على حالتين: حالة التشغيل ، وهو عندما يعمل المُكوّن بشكل طبيعي. وحالة العطل عندما يكون المُكوّن غير مُتاح بسبب انقطاع الخدمة أو عطل.

تحدث انتقالات الحالة بمعدل: معدل العطل λ و معدل الإصلاح μ كما موضح في نموذج ماركوف ثنائي الحالة المبين في الشكل 9-1 . أبسط نموذج وثوقية هو:

$$\text{معطل} \underset{\mu}{\overset{\lambda}{\rightleftharpoons}} \text{شغال}$$



حيث:

λ = معدل الفشل (عدد حالات الفشل/ سنة)

μ = معدل الإصلاح (عدد حالات الإصلاح/ سنة)

لنفترض الآن:

P_0 = احتمال أن يكون النظام يعمل

P_1 = احتمال أن يكون النظام معطلاً

باستخدام معادلات توازن ماركوف:

$$P_0\lambda = P_1\mu$$

وأيضًا:

$$P_0 + P_1 = 1$$

الحل:

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

1-4-9 التوافرية وعدم التوافرية

يجب أن يكون كل مكون في إحدى حالتين:متوفر (مُفعّل أو متاح) UP (available) أو غير متوفر (غيرمُفعّل أوغير متاح) DOWN (unavailable).

التوافرية A: هي احتمالية أن يكون النظام في حالة إشتغال UP (متاح) (available) :

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

وعدم التوافرية U هي احتمالية أن يكون النظام في حالة غير متوفر (معطل أوغير متاح DOWN (unavailable)

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

- في حالة التوصيل التسلسلي، يتدفق التيار عندما تكون جميع المكونات في حالة مُفعّل UP state.
- في حالة التوصيل المتوازي، يتدفق التيار فقط عند وجود مسار واحد أو أكثر متوازي.

2-4-9 تطبيقات على أنظمة النقل

تُطبَّق طرق ماركوف على: خطوط النقل المفردة ، خطوط النقل المزدوجة ، أنظمة متعددة المناطق ، تقييم وثوقية الشبكة ، أنظمة توليد ونقل الطاقة المركبة .

مثال 9-1:

لخط نقل أحادي فيه معدل الأعطال: $\lambda = 0.1$ عطل/ سنة ، ومعدل الإصلاح: $\mu = 20$ إصلاح/ سنة .

جد التوافرية وعدم التوافرية لهذا الخط .

الحل :

التوافرية :

$$A = \frac{20}{20 + 0.1}$$

$$A = 0.995$$

عدم التوافرية :

$$U = \frac{0.1}{0.1 + 20} = 0.05$$

- **نموذج ماركوف متعدد الحالات**

تتطلب الأنظمة المعقدة عددًا أكبر من الحالات. فمثلاً لخط نقل مزدوج توصف حالته كالتالي:

S0: كلا الخطين يعملان

S1: تعطل أحد الخطين

S2: تعطل كلا الخطين

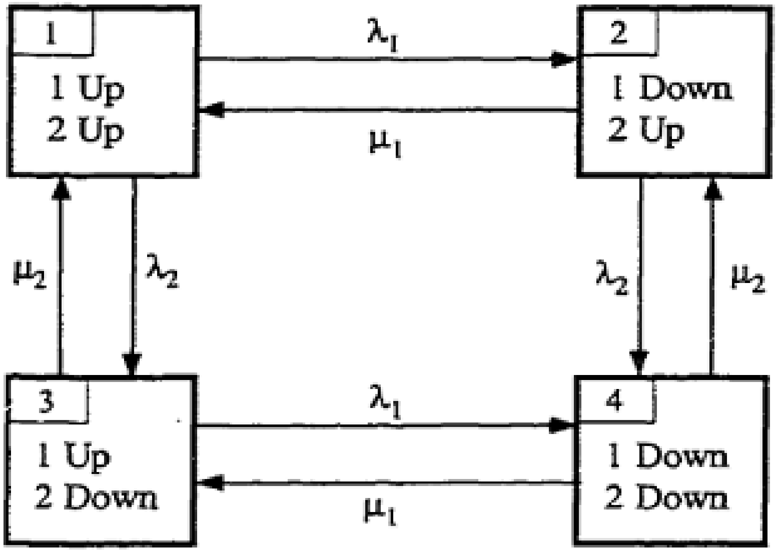
تحدث الانتقالات بين الحالات المتجاورة بحيث يساعد هذا النموذج في تقييم ما يلي: الانقطاعات الجزئية، انخفاض قدرة النقل ، فائض النظام .

للحالات المتعددة، تُمثل احتمالات الانتقال بمصفوفة تسمى " مصفوفة انتقال الحالة State Transition Matrix " كالآتي:

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix}$$

وفي حالة وجود مكونات في النظام أكثر ، تكون المصفوفة ذات مرتبة أعلى.

يوضح الشكل 9-2 مخطط انتقال فضاء الحالة لنظام مكون من عنصرين. يُطلق على هذا المخطط اسم نمذجة ماركوف مع حالة طقس واحدة.



الشكل 9-2 مخطط فضاء الحالة لنظام ثنائي المكونات، حيث λ هو معدل الفشل وμ هو معدل الإصلاح = r/1 (r = زمن الإصلاح).

احتمالات الحالة: State probabilities

كما أن احتمال وجود عنصر في حالة الإيقاف هو λ/(λ+μ)، وفي حالة التشغيل هو μ/(λ+μ)، وبالتالي،

إحتمال أن تكون في الحالة1 $= \frac{\mu_1}{\lambda_1+\mu_1} \times \frac{\mu_2}{\lambda_2+\mu_2}$

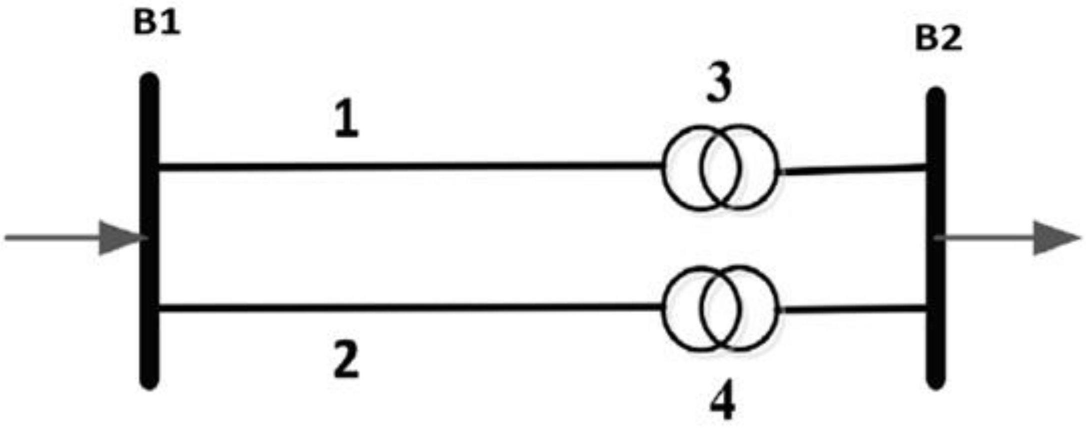
$$\frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \times \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} = 2$$ إحتمال أن تكون في الحالة

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \times \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} = 3$$ إحتمال أن تكون في الحالة

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \times \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} = 4$$ إحتمال أن تكون في الحالة

- **تقنيات ماركوف للحالات المتعددة**

كما ذُكر سابقًا، تُعدّ عمليات ماركوف الطريقة الأكثر دقة لتقييم وثوقية الشبكة. مع ذلك، تصبح هذه التقنية معقدة للغاية حتى بالنسبة للأنظمة البسيطة نسبيًا، وقد تبيّن أن الزيادة في الدقة ضئيلة. لتوضيح هذه التقنية، لنفترض النظام الموضح في الشكل 9-3 أدناه، مع تجاهل تأثيرات الصيانة وافتراض حالة جوية واحدة.



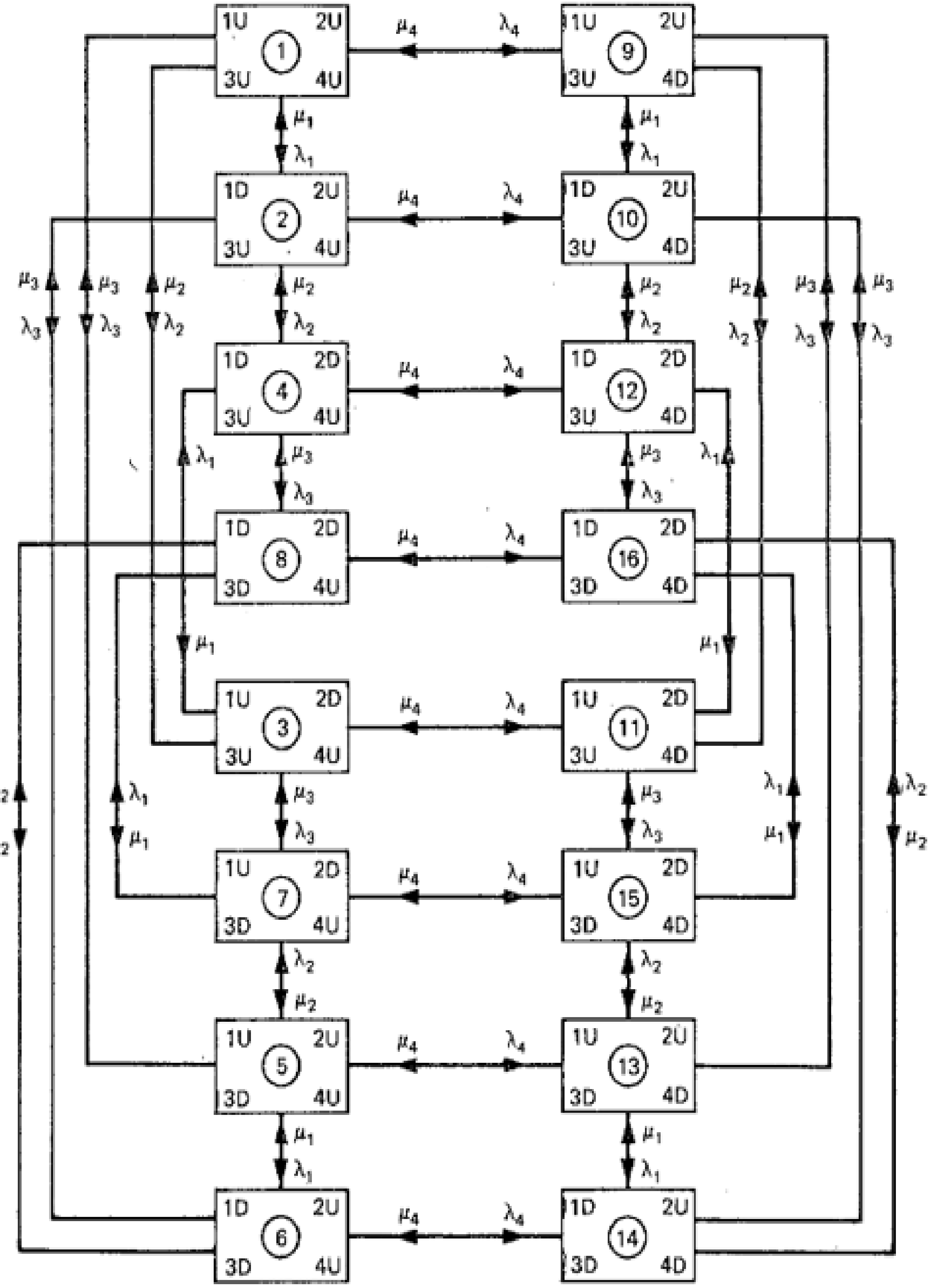
الشكل 9-3 .

إذا اعتبرنا أن كل مكون موجود في إحدى حالتين (أعلى أو أسفل)، فبالنسبة لنظام مكون من 4 مكونات كما هو موضح في الشكل 9-3، فإن هناك $4^2 = 16$ حالة يجب أخذها في الاعتبار. وهذه هي مبينة في الجدول 9-1:

ويكون مخطط فضاء الحالة للنظام الموضح في الشكل 9-3 كما مبين في الشكل 9-4 .

الجدول 9-1.

المكون Component	1	2	3	4
State الحالة 1	U	U	U	U
2	D	U	U	U
3	U	D	U	U
4	D	D	U	U
5	U	U	D	U
6	D	U	D	U
7	U	D	D	U
8	D	D	D	U
9	U	U	U	D
10	D	U	U	D
11	U	D	U	D
12	D	D	U	D
13	U	U	D	D
14	D	U	D	D
15	U	D	D	D
16	D	D	D	D



الشكل9-4: مخطط فضاء الحالة للنظام الموضح في الشكل 9-3.

5-9 تقييم وثوقية نظام خط نقل واحد باستخدام طريقة ماركوف مع مراعاة حالتين جويتين

في شبكات نقل الطاقة، تُستخدم خطوط النقل المتوازية عادةً لتحسين وثوقية واستمرارية الإمداد.وعند أخذ الظروف الجوية في الاعتبار، يصبح تحليل الوثوقية أكثر واقعية لأن سوء الأحوال الجوية يزيد بشكل كبير من احتمالية انقطاع التيار الكهربائي. والنهج الأكثر شيوعًا هو نموذج ماركوف ذو الحالتين الجويتين حيث يؤخذ بعين الإعتبار عمل النظام في ظل:

1. حالة جوية طبيعية (N)

2. حالة جوية سيئة / عاصفة (S)

لكل حالة جوية خصائصها المختلفة مثل : معدلات الأعطال ، معدلات الإصلاح ، واحتمالات الانتقال .

والحاجة إلى نمذجة حالتي الطقس لكون أنه تزداد انقطاعات خطوط النقل خلال العواصف و الأمطار الغزيرة والثلوج والبرق والرياح العاتية ، لذا، فإن افتراض معدل فشل ثابت غير واقعي. عليه يحسن نموذج الطقس ذو حالتي الطقس ما يلي: الدقة ، تقييم المخاطر ، وثوقية التخطيط

1-5-9 حالات الطقس

تتعرض جميع شبكات أنظمة الطاقة لتقلبات جوية متغيرة. من المعروف أن معدل الأعطال خلال نوع معين من الطقس قد يختلف اختلافًا كبيرًا عن معدل الأعطال خلال نوع آخر، وعلى الرغم من إمكانية ترجيح هذه المعدلات معًا للحصول على قيمة متوسطة (λa)، إلا أن هذا قد يعطي قيمًا مضللة للغاية، لأن معظم الأعطال تحدث في ظروف جوية سيئة، والتي عادةً ما تكون قصيرة الأمد. لهذا السبب، يُفضل تقسيم بيئة الطقس إلى حالتين: حالة الطقس العادي Normal weather وحالة الطقس السيئ (العاصف) Adverse (stormy) weather وكالآتي:

1. طقس عادي (N) تكون خصائصه كالآتي: معدل أعطال منخفض ، تشغيل مستقر ، إصلاحات أسرع.

معدل الأعطال: λ_N ، معدل الإصلاح: μ_N .

2. طقس عاصف / الطقس السيئ (S) تكون خصائصه كالآتي: احتمالية عالية لانقطاع الخدمة ، اضطرابات شديدة ، ظروف إصلاح صعبة حيث يكون خلاله معدل الأعطال:λ_S ، ومعدل الإصلاح: μ_S ، وعادةً ما تكون : $\lambda_S \gg \lambda_N$.

ويتصرف الطقس نفسه كعملية ماركوف كأن تمثل تحولات الطقس: $N \underset{\beta}{\overset{\alpha}{\rightleftharpoons}} S$

حيث:

α = معدل التحول من الطقس العادي إلى الطقس العاصف

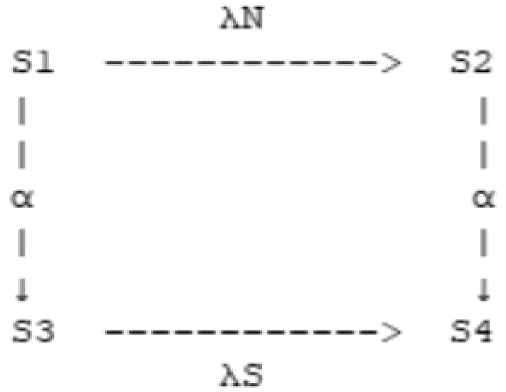
β = معدل التحول من الطقس العاصف إلى الطقس العادي

حالات نظام النقل المُجمّعة

بالنسبة لخط نقل واحد، تكون الحالات المُجمّعة كما يلي:

الحالة	حالة الخط (الطقس)
الحالة 1:	تشغيل طبيعي للخط
الحالة 2:	تعطل طبيعي للخط
الحالة 3:	تشغيل أثناء العواصف
الحالة 4:	تعطل أثناء العواصف

وبذلك، يصبح النموذج نموذج ماركوف رباعي الحالات. ويكون مخطط انتقال الحالة كالآتي (الشكل 9-3) التالي:



الشكل 9-3 مخطط انتقال الحالة خلال الحالات الجوية .

أما عمليات الإصلاح الانتقالية فتكون كالآتي :

$S2 \rightarrow S1$ مع μN

$S4 \rightarrow S3$ مع μS

والتعافي من آثار الطقس:

$S3 \rightarrow S1$ مع β

$S4 \rightarrow S2$ مع β

احتمالات الحالات :

لنفترض أن:

$P_1 =$ احتمال الحالة S_1

$P_2 =$ احتمال الحالة S_2

$P_3 =$ احتمال الحالة S_3

$P_4 =$ احتمال الحالة S_4

وشرط الحالة المستقرة:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$$

وتُصاغ معادلات التوازن باستخدام معدلات الانتقال كما يأتي :

معادلات الحالة المستقرة **Steady-State Equations**

بالنسبة للحالة S1:

$$(\lambda_N + \alpha)P_1 = \mu_N P_2 + \beta P_3$$

بالنسبة للحالة S2:

$$(\mu_N + \alpha)P_2 = \lambda_N P_1 + \beta P_4$$

بالنسبة للحالة S3:

$$(\lambda_S + \beta)P_3 = \alpha P_1 + \mu_S P_4$$

بالنسبة للحالة S4:

$$(\mu_S + \beta)P_4 = \lambda_S P_3 + \alpha P_2$$

توافر النظام

يكون خط النقل متاح في الحالتين : S1 و S3 ، لذلك:

$$A = P_1 + P_3$$

ويكون النظام غير متوفر في الحالتين S2 و S4 ، لذلك:

$$U = P_2 + P_4$$

تمرين 9-2 :

بافتراض أن : في الطقس العادي يكون معدل الأعطال: λ_N=0.05 انقطاع/ سنة ، ومعدل الإصلاح:

μ_N=50 إصلاح/ سنة. في الطقس العاصف يكون معدل الأعطال: λS=1.0 انقطاع / سنة ، ومعدل الإصلاح: μS=20 إصلاح / سنة ومعدلات تغير الطقس : عادي ← عاصف: α=2 تغير/ سنة ، ومن عاصف ← عادي:β=20 تغير/ سنة. باستخدام معادلات ماركوف، إحسب احتمالات الحالة، ثم جد :

(أ) التوافرية

(ب) مدة الانقطاع المتوقعة

(جـ) مؤشرات الوثوقية

9-5-2 تقييم وثوقية خطي نقل طاقة باستخدام طريقة ماركوف مع مراعاة حالتين جويتين

في شبكات نقل الطاقة، تُستخدم خطوط النقل المتوازية عادةً لتحسين وثوقية واستمرارية الإمداد.وعند أخذ الظروف الجوية في الاعتبار، يصبح تحليل الوثوقية أكثر واقعية لأن سوء الأحوال الجوية يزيد بشكل كبير من احتمالية انقطاع التيار الكهربائي. والنهج الأكثر شيوعًا هو نموذج ماركوف ذو الحالتين الجويتين حيث يؤخذ بعين الإعتبار عمل النظام في ظل:

1. حالة جوية طبيعية (N)

2. حالة جوية سيئة / عاصفة (S)

لكل حالة جوية خصائصها المختلفة مثل : معدلات الأعطال ، معدلات الإصلاح ، واحتمالات الانتقال .

والحاجة إلى نمذجة حالتي الطقس لكون أنه تزداد انقطاعات خطوط النقل خلال العواصف و الأمطار الغزيرة والثلوج والبرق والرياح العاتية ، لذا، فإن افتراض معدل فشل ثابت غير واقعي. عليه يحسن نموذج الطقس ذو حالتي الطقس ما يلي: الدقة ، تقييم المخاطر ، وثوقية التخطيط.

وصف النظام : لنفترض لدينا خطان متطابقان لنقل الطاقة ، يمكن أن يكون كل خط: عامل أو معطل. ويمكن أن تكون حالة الطقس: عادي أو عاصف. وبالتالي، تعتمد وثوقية النظام على: عدد الخطوط المتاحة وحالة الطقس الحالية.

عند الأخذ بعين الإعتبار حالات الطقس تكون الإفتراضات كالتالي .

1. حالة الطقس العادية (N) - الخصائص: معدل أعطال منخفض ، إصلاح أسرع .

المعايير:

λ_N = معدل الأعطال في حالة الطقس العادية

μ_N = معدل الإصلاح في حالة الطقس العادية

2. حالة الطقس العاصف (S) - الخصائص: معدل عطل مرتفع ، بطء الإصلاح

المعايير:

λ_S = معدل العطل أثناء الطقس العاصف

μ_S = معدل الإصلاح أثناء الطقس العاصف

وعادةً ما تكون : $\lambda_S \gg \lambda_N$

حالات النظام

بالنسبة لخطّي نقل، فإنّ حالات التشغيل الممكنة هي:

حالة عمل خطي النقل

S1 - الطقس عادي، كلا الخطين يعملان

S2- الطقس عادي، خط واحد معطل

S3- الطقس عادي، كلا الخطين معطلان

S4 - الطقس عاصف، كلا الخطين يعملان

S5 - الطقس عاصف: فشل خط واحد

S6 - الطقس عاصف: فشل كلا الخطين

وبذلك، يصبح النظام نموذج ماركوف للنظام بست 6 حالات.

معدلات انتقال الحالة

في ظل ظروف جوية طبيعية :

من S1 إلى S2 ، قد يتعطل خطان سليمين: $2\lambda_N$.

من S2 إلى S3 يتعطل الخط المتبقي: λ_N

الإصلاحات :

$S3 \rightarrow S2: 2\mu_N$ و $S2 \rightarrow S1: \mu_N$

في ظل ظروف جوية عاصفة :

من $S_4 \rightarrow S_5$ ، $2\lambda_S$

من $S_5 \rightarrow S_6$ ، λ_S

الإصلاحات

$$S_5 \rightarrow S_4: \mu_S$$

$$S_6 \rightarrow S_5: 2\mu_S$$

تغيرات الطقس

تؤثر تغيرات الطقس على جميع حالات التشغيل:

$$S_1 \leftrightarrow S_4$$

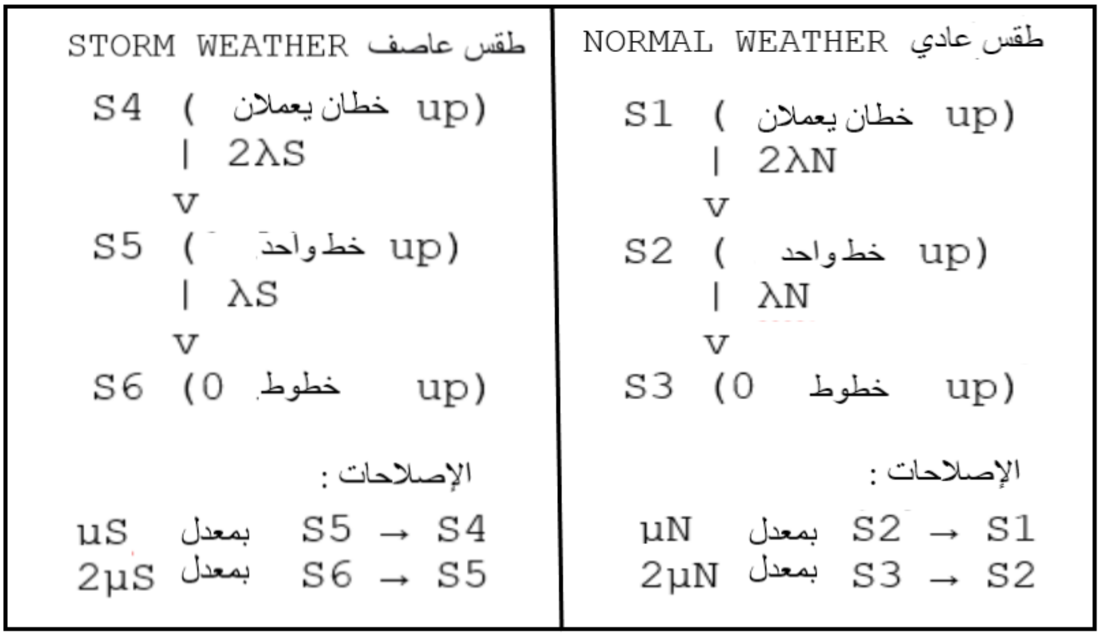
$$S_2 \leftrightarrow S_5$$

$$S_3 \leftrightarrow S_6$$

بمعدلات

- α
- β

المخطط لحاللات ماركوف يصبح كما في الشكل 9-5 التالي :



الشكل 9-5.

احتمالات الحالة

لنفترض:

S_i احتمالية الحالة $= P_i$

حالة التطبيع:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1$$

توفرية (جاهزية) النظام

يكون النظام متوفراً (جاهزًا) تمامًا عند تشغيل خط واحد على الأقل.

الحالات المتاحة: S1 ، S2 ، S4 ، S5

وبالتالي:

$$A = P_1 + P_2 + P_4 + P_5$$

عدم توفر النظام

يتعطل النظام تمامًا عند انقطاع كلا الخطين.

حالات عدم التوفر: S3 ، S6 ، وبالتالي

$$U = P_3 + P_6$$

التفسير

في الأحوال الجوية العادية ، يكون احتمال انقطاع الخدمة المتزامن منخفض جدًا وتكون جاهزية النظام عالية. أما في الأحوال الجوية العاصفة تزداد حالات الأعطال المشتركة.و قد يتعطل كلا الخطين في وقت واحد. بذلك تنخفض الوثوقية بشكل ملحوظ.

6-9 طريقة ألتردد (التكرار) والمدة (الطريقة التقريبية)

Frequency and Duration (F&D approximate) method

1-6-9 التعريفات المستخدمة في طريقة ألتردد (التكرار) والمدة

1. تكرار مواجهة حالة ما:

تكرار مواجهة حالة ما = (احتمالية التواجد في حالة ما) × (معدل الخروج من تلك الحالة).

أو :

$f1 = P1 (\lambda_1 + \lambda_2)$ O/yr (انقطاع الخدمة / سنة)

$f2 = P2 (\lambda_2 + \mu_1)$ O/yr

$f3 = P3 (\lambda_1 + \mu_2)$ O/yr

$f1 = P1 (\mu_1 + \mu_2)$ O/yr

f1 O/yr = f (حالة الانقطاع) = f (حالة التشغيل)

2. مدة البقاء في الحالة:

مدة البقاء في الحالة = 1 / (تكرار حدوث الحالة) × احتمال حدوث الحالة

إذن،

مدة البقاء في الحالة 1 $= \frac{P_1}{f_1}$

مدة البقاء في الحالة 2 = $\frac{P_2}{f_2}$

مدة البقاء في الحالة 3= $\frac{P_3}{f_3}$

مدة البقاء في الحالة 4 = $\frac{P_4}{f_4}$

مدة البقاء في حالة التعطل = (P(حالةالتعطل)) / (f(حالةالتعطل))

$$Duration\ in\ the\ (down\ state) = \frac{P\ (Down\ state)}{f(Down\ state)}$$

3. مؤشرات وثوقية النظام: في طريقة التكرار والمدة، تُستخدم مؤشرات الوثوقية التالية:

λ = معدل الفشل المتوقع للنظام

r = متوسط مدة الانقطاع

U = مدة عدم التوفر أو مدة الانقطاع السنوية

مثال 9-3:

يتكون نظام من مكونين متطابقين، ويجب أن يعمل كلاهما لضمان نجاح النظام. فإذا كان معدل فشل كل مكون 1 فشل/ سنة، ووقت إصلاح الانقطاع 24 ساعة، فاحسب احتمالية الحالة المستقرة، وتكرار ومدة التواجد في جميع الحالات الممكنة، واحتمالية الحالة المستقرة، وتكرار ومدة التواجد في حالة التوقف، باستخدام تقنية نمذجة ماركوف.

الحل: انظر إلى الشكل9-2:

λ = λ1 = λ2 = 1 f/yr

μ = μ1 = μ2 = 8760/24 = 365 r/yr

احتمالية (الحالة - 1) = احتمالية (up1) × احتمالية (up2)

احتمال الحالة 1 = $\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \times \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}$

$$0.9946 = \frac{365}{365+1} \times \frac{365}{365+1} =$$

احتمالية (الحالة 2) = احتمالية (الحالة 3)

= احتمال (up1) × احتمال (down 2)

$$0.0027 = \frac{365}{365+1} \times \frac{1}{365+1} =$$ احتمال الحالة 3&2

الاحتمال (الحالة - 4) = احتمال (1 معطل) × احتمال (2معطل)

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \times \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} =$$

$$0.0000 \;\; = \frac{1}{365+1} \times \frac{1}{365+1} =$$

احتمالية (حالة التعطل) = P2 + P3 + P4 = 0.0054

تكرار مواجهة الحالة = (احتمالية التواجد في الحالة) × (معدل المغادرة).

$f_1 = P_1 (\lambda_1 + \lambda_2) = \frac{365^2}{366^2} (1 + 1) = 1.99$ O/yr

$f_2 = f_3 = P_2 (\lambda_1 + \mu_2) = \frac{365^2}{366^2} (1 + 365) = 0.997$ O/yr

$f_4 = P_4 (\mu_1 + \mu_2) = \frac{1}{366^2} (365 + 365) = 0.0054$ O/yr

f (حالة العطل) = f (حالة الإشتغال) = f1 = 1.99 أنقطاع / سنة

مدة البقاء في الحالة = (احتمالية مواجهة الحالة) ÷ (تكرار مواجهة الحالة)

مدة البقاء (في الحالة 1) = $\frac{P_1}{f_1}$ = 0.5 سنة

مدة البقاء (في الحالة 2) = مدة البقاء (في الحالة 3) = $\frac{P_2}{f_2}$ = 0.0027 سنة

مدة البقاء (في الحالة 4) = $\frac{P_4}{f_4}$ = 0.0014 سنة

مدة البقاء في (حالة التعطل) = (احتمال (حالة التعطل)) ÷ (دالة (حالة التعطل)) = 0.0027 سنة

9-7 الطرق التقريبية

تُعدّ طريقة تعتمد على مجموعة من المعادلات المناسبة لتقييم معدل الفشل، ومدة الانقطاع، والوقت السنوي لعدم التوافر، بديلاً عن مخططات فضاء الحالة. ويمكن اشتقاق هذه المعادلات بالطرق التالية.

9-7-1 المكونات المربوطة في توالٍ Series Components

إذا كانت المكونات متصلة على التوالي، فيجب أن يعمل كلاهما (UP) لنجاح النظام، أي أن حالة UP هي الحالة 1 في مخطط فضاء الحالة الموضح في الشكل9-2.

$$\frac{\mu_1}{\lambda_1+\mu_1}\times\frac{\mu_2}{\lambda_2+\mu_2}=\frac{\mu_s}{\lambda_s+\mu_s}$$

وبما أن $\mu = 1/r$، فإن هذه المعادلة تصبح

$$r_s=\frac{\lambda_1 r_1+\lambda_2 r_2+\lambda_1\lambda_2 r_1 r_2}{\lambda_s}\cong\frac{\lambda_1 r_1+\lambda_2 r_2}{\lambda_s}$$

أو ان

$$r_s=\frac{\sum\lambda.r}{\lambda_s}$$

وبافتراض ان التوزيع الأسي Exponential distribution:

فان احتمالية الفشل Probability of failure تكون:

$$\left(1-e^{-\lambda_1 t}\right)\left(1-e^{-\lambda_2 t}\right)=\left(1-e^{-\lambda_s t}\right)$$

واحتمالية النجاح (الحالة-1) (state 1) probability of success :

$$e^{-\lambda_1 t}\,.\,e^{-\lambda_2 t}=e^{-\lambda_s t}$$

$$=e^{-(\lambda_1+\lambda_2)\,t}=e^{-\lambda_s t}$$

أو أن

$$\lambda_s\cong(\lambda_1+\lambda_2)$$

$$\lambda_s = (\lambda_1 + \lambda_2) = \sum \lambda$$

ويمكن الآن كتابة عدم توفر المكونين المتصلين على التوالي على النحو التالي:

$$U = \frac{\lambda_s}{\lambda_s + \mu_s} = \frac{\lambda_s}{\lambda_s + \frac{1}{r_s}} = \frac{\lambda_s r_s}{r_s \lambda_s + 1} \cong \lambda_s r_s \quad \text{ساعة في السنة}$$

أو يمكن كتابته بالشكل التالي :

$$U_s = \sum \lambda\, r$$

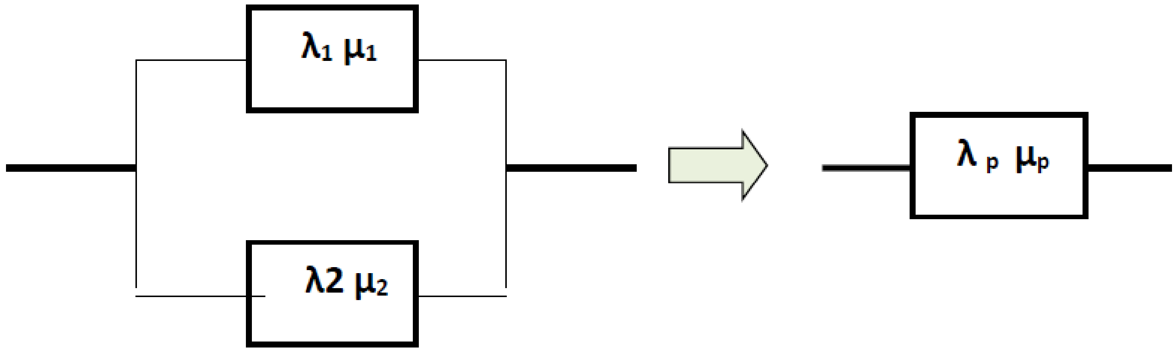
لاحظ ما يلي:

تُسمى r_s و λ_s و U_s مؤشرات النظام System indices

وتُسمى λ_1 و λ_2 و r_1 و r_2 معلمات المكون Component parameters

2-7-9 المكونات المربوطة في توازٍ Parallel Components

إذا كانت المكونات موصولة على التوازي كما في الشكل 9-5 ، فيجب أن يتعطل كلاهما لحدوث عطل في النظام، أي أن حالة التعطل هي الحالة 4 في مخطط فضاء الحالة الموضح في الشكل 9-4 .



السكل 9-4 المكونات الموصولة على التوازي.

في هذه الحالة :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \times \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} = \frac{\lambda_p}{\lambda_p + \mu_p}$$

مرة أخرى، إذا افترضنا التوزيع الأسي:

احتمالية الفشل =

$$e^{-\mu_1 t} . \; e^{-\mu_2 t} = e^{-\mu_p t}$$

$$\mu_p \; \cong (\mu_1 + \mu_2)$$

$$\frac{1}{r_p} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

$$\therefore \quad r_p = \frac{r_1 \; r_2}{r_1 + \; r_2}$$

وبالمثل بالنسبة لـ λ_p

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_{1+} r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2}$$

$$\lambda_p \cong \lambda_1 \lambda_2 (r_{1+} r_2)$$

$$U_p = \; \lambda_p \, r_p$$

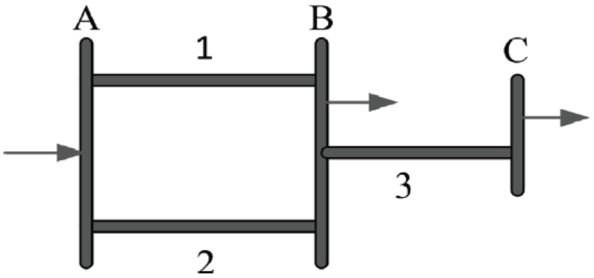
على الرغم من أن هذه المعادلات قد اشتُقت من افتراض التوزيع الأسي، إلا أنها تمثل قيمًا متوقعة أو متوسطة، ويمكن إثبات صحتها بغض النظر عن افتراض التوزيع.

مثال 9-4 (توصيل على التوالي/التوازي):

لتوضيح تطبيقات التقنيات أعلاه أ، دعونا ننظر في خطوط نقل الطاقة التي تغذي مجمع صناعي كبير. خطوط النقل مع نقاط تحميل البيانات الخاصة بها موضحة أدناه (انظر الشكل9-5). المطلوب هو تقييم مؤشرات وثوقية نقاط التحميل (قضبان التوزيع) عند قضيبَي التوزيع B وC .

الحل:

لإيجاد المؤشرات عند قضيب التوصيل B، يجب دمج الخطين 1 و2 بالتوازي باستخدام المعادلة (22):



Line #	(f / yr)	r (hrs.)
1	0.5	5
2	0.5	5
3	0.1	10

الشكل9-5. تكوين خطوط النقل مع نقاط تحميل البيانات.

$$\begin{aligned}\lambda_B &= \lambda_1\,\lambda_2\,(r_1 + r_2)\\ &= 0.5 \times 0.5(5+5)/8760\\ &= 2.854 \times 10^{-4} f/y\end{aligned}$$

حيث يمثل 8760 إجمالي عدد الساعات في السنة، باستخدام المعادلة (20).

$$r_B = \frac{r_1\,r_2}{r_1 + r_2} = \frac{5 \times 5}{5+5} = 2.5\ \text{h.}$$

$$\begin{aligned}U_B &= \lambda_B r_B\\ &= 2.854 \times 10^{-4} \times 2.5/8760\\ &= 8.145 \times 10^{-8}\ \text{yrs/yrs} = \textit{probability}\\ &= 7.135 \times 10^{-4}\ \text{h/yrs.}\end{aligned}$$

لإيجاد المؤشرات عند قضيب التوصيل C، يجب دمج الخطين 1 و2 على التوازي (كما هو موضح أعلاه) ثم دمجهما مع الخط 3 على التوالي، باستخدام المعادلة (14):

$$\begin{aligned}\lambda_C &= \lambda_B + \lambda_3\\ &= 2.854 \times 10^{-4} + 0.1\\ &= 1.003 \times 10^{-1} f/yr\end{aligned}$$

$$r_C = \frac{U_B + \lambda_3 r_3}{\lambda_C}$$

$$\begin{aligned}r_C &= \frac{7.135 \times 10^{-4} + 0.1 \times 10}{1.003 \times 10^{-1}}\\ &= 9.977\ \text{h.}\end{aligned}$$

$$U_C = \lambda_C r_C$$
$$\therefore U_C = 1.003 \times 10^{-1} \times 9.977$$
$$= 1.001 \text{ h/yrs.}$$

في هذه الحالة، يُلاحظ أن مؤشرات قضيب التوصيل C تتأثر بشكل كبير بمؤشرات الخط 3. وهذا متوقعٌ تمامًا، إذ سيتعطل قضيب التوصيل C في حال تعطل الخط 3 أو الخطين 1 و2 معًا. وبالتالي، يُعد تعطل الخط 3 حدثًا من الدرجة الأولى، بينما يُعد تعطل الخطين 1 و2 حدثًا من الدرجة الثانية. ويجب التأكيد على أن هذا صحيحٌ فقط إذا كانت مؤشرات موثوقية المكونات متقاربة؛ فإذا كان المكون الذي يُشكل الحدث منخفض الدرجة موثوقًا للغاية، وكانت المكونات التي تُشكل الأحداث عالية الدرجة غير موثوقة للغاية، فقد يحدث العكس.

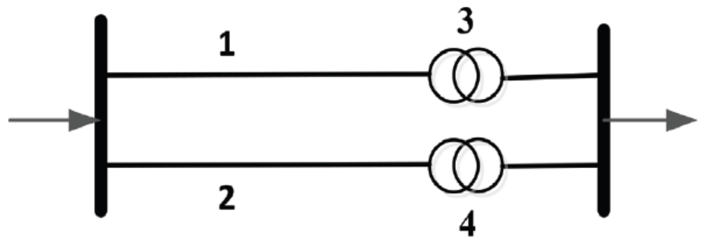
3-7-9 تقنية اختزال الشبكة لتحليل أنماط الفشل

Network reduction for failure mode analysis

في بعض الحالات، تندمج بعض المناطق الحرجة أو غير الموثوقة في عناصر مكافئة، ويصبح من المستحيل تحديدها. البديل هو التأثير على النظام، وإعداد قائمة بنقاط الفشل، أي انقطاعات المكونات التي يجب أن تتداخل لتتسبب في انقطاع النظام. تُعتبر هذه الانقطاعات المتداخلة عناصر متوازية، ويمكن دمجها باستخدام معادلات المكونات المتوازية. أي من هذه الانقطاعات المتداخلة سيؤدي إلى فشل النظام، وبالتالي، من وجهة نظر الوثوقية، تُعتبر متسلسلة. يمكن بالتالي تقييم مؤشرات النظام من خلال تطبيق معادلات السلسلة السابقة على هذه الانقطاعات المتداخلة.

تُسلّط دراسة الحالة التالية الضوء على خط ربط يربط المنطقة الشرقية بالمنطقة الوسطى (بمسافة 400 كم بينهما) في احدى الدول العربية . وتُعدّ المنطقة الشرقية في هذه الدولة حاضنة لصناعة النفط بكل ما فيها من مصافي وبنية تحتية. تقع عاصمة الدولة في المنطقة الوسطى، وهي مقر الشركة العامة للكهرباء. وتتطلع الشركة إلى توسع هائل مع تزايد الأحمال الصناعية المستقبلية بشكل كبير. ولذلك، يتم نقل كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية من المنطقة الشرقية إلى المنطقة الوسطى عبر خط الربط. لذا، ولتقييم وثوقية

هذا الخط باستخدام المفاهيم والمنهجية المذكورة أعلاه، يُعتبر خط الربط (انظر الشكل 9-6) حاملاً البيانات التالية:



Component	λ (f / yr)	r (hrs.)
1	0.5	10
2	0.5	10
3	0.01	100
4	0.01	100

الشكل9-6. تكوين خطوط الربط مع نقاط تحميل البيانات.

الحل :

أ. استخدام اختزال الشبكة

يؤدي دمج العنصرين 1 و3 على التوالي كما في المعادلة (12) إلى:

$$r_{1,3} = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_3 r_3}{\lambda_s} = \frac{0.5 \times 10 + 0.01 \times 100}{0.51} = 11.76 \quad \text{hr}$$

مؤشرات نقطة التحميل هي

$$\lambda_s = 6.984 \times 10^{-4} \ \ f/y \quad r_2 = 5.88 \ \ \text{hr}$$

$$U_s = 4.1066 \times 10^{-3} \quad \text{hr/yr}$$

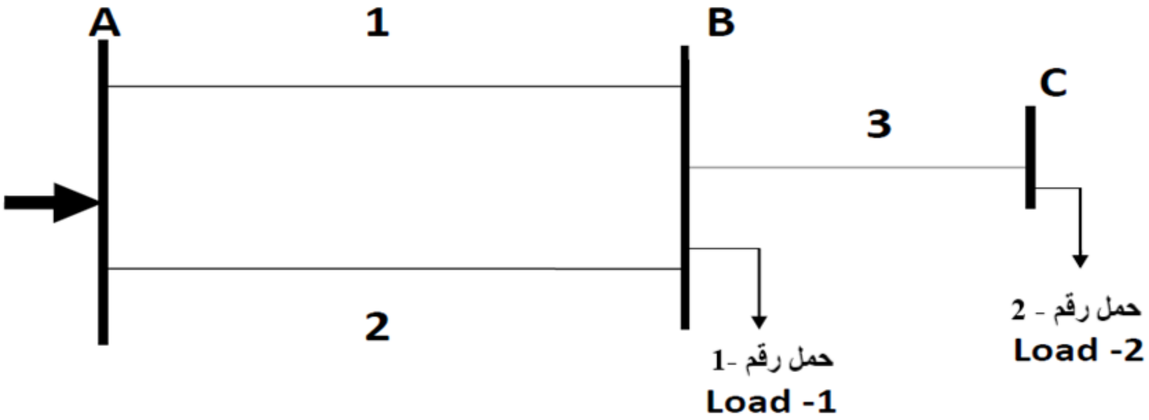
ب. استخدام تحليل أنماط الفشل

Overlapping outages	λ (f/yr)	r (h)	U h (h/yr)
1 and 2	5.7080×10^{-14}	5	2.854×10^{-14}
1 and 4	0.6279×10^{-14}	9.091	5.708×10^{-14}
2 and 3	0.6279×10^{-14}	9.091	5.708×10^{-14}
3 and 4	0.0228×10^{-14}	50	1.142×10^{-14}
	$6.987 \times 10^{-14} = \lambda_s$	$5.88 = r_s$	4.110×10^{-14} $\lambda_s \times r_s$

على الرغم من أن الطريقة الثانية تبدو أطول، إلا أنه من الجدير بالذكر أنها توفر معلومات أكثر. فهي تشير إلى أن معدل الفشل وعدم التوافر يعودان بشكل رئيسي إلى تداخل أعطال الخطين؛ ومع ذلك، فإن متوسط مدة الانقطاع يعود بشكل رئيسي إلى تداخل انقطاعات المحولين. هذه المعلومات، التي تُعد حيوية في تقييم المناطق الحرجة وتحديد المناطق التي تتطلب المزيد من الاستثمار، لا توفرها تقنية تقليل حجم الشبكة.

مثال 9-5:

بالنظر إلى نظام النقل الموضح في الشكل 9-7، يتم تقييم مؤشرات الوثوقية (معدل الأعطال، متوسط مدة الانقطاع، ومدة الانقطاع السنوية) عند نقاط التحميل: الحمل 1 والحمل 2 في الشكل 9-7، مع افتراض أن قضبان التوصيل موثوقة بنسبة 100%. بيانات وثوقية المكونات موضحة في الجدول9-3.



الشكل 9-7 .

الجدول 9-3.

Line	λ (f/yr)	r (hr)
1	0.5	5
2	0.5	5
3	0.1	10

الحل :

1- استخدام تقنيات اختزال الشبكة:

لإيجاد المؤشرات عند قضيب التوصيل B، يجب دمج الخط 1 والخط 2 بالتوازي:

$$\lambda_B = \lambda_1 \lambda_2 (r_{1+} r_2)$$

$$\lambda_{\boldsymbol{B}} = 0.5\ x\ 0.5\ \frac{(5+5)}{8760} = 2.854\ x\ 10^{-4}$$ فشل في السنة

$$r_B = \frac{r_1\ r_2}{r_1 +\ r_2} = \frac{5x5}{5+5} = 2.5$$ ساعة

$$U_B =\ \lambda_B\, r_B = 2.854\ x\ 10^{-4} x\ \frac{2.5}{8760} = 8.145x10^{-8}$$ سنين في السنة

أو

$$U_B =\ \lambda_B\, r_B = 2.854\ x\ 10^{-4} x\ 2.5 = 7.135x10^{-4}$$ سنين في السنة

لإيجاد المؤشرات عند قضيب التوزيع C، يجب دمج الخطين 1 و 2 بالتوازي (كما هو مذكور أعلاه) ويتم دمجهما على التوالي مع الخط 3.

$$\lambda_C = (\lambda_B + \lambda_3) = 2.854\ x\ 10^{-4} +\ 0.1 =\ 1.003\ x\ 10^{-1}$$ فشل في السنة

$$r_C = \frac{\sum \lambda . r}{\lambda_s} = \frac{\lambda_B r_B + \lambda_3\, r_3}{\lambda_C} = \frac{U_B + \lambda_3\, r_3}{\lambda_C} = \frac{7.135x10^{-4} + 0.1x10}{1.003\ x\ 10^{-1}}$$

$$= 9.977$$ ساعة

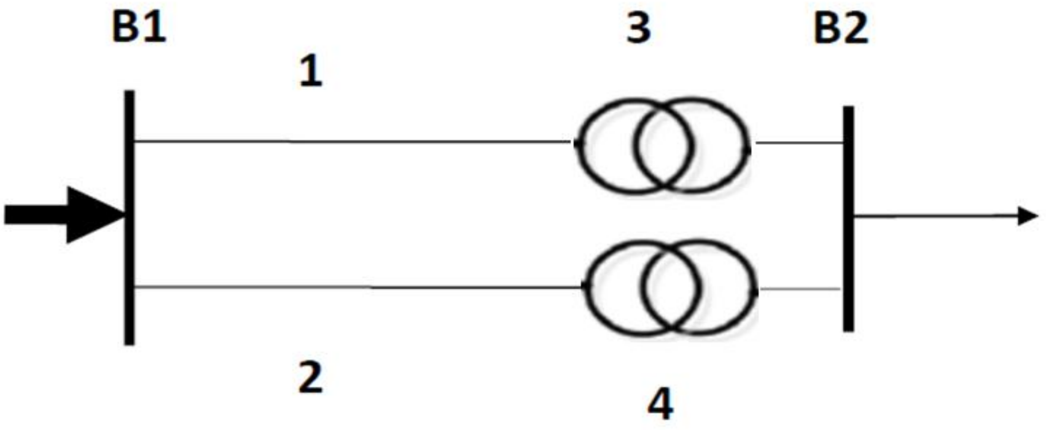
$$U_C =\ \lambda_C\, r_C =\ 1.003\ x\ 10^{-1}\ x\ 9.977$$ ساعة في السنة

في هذه الحالة، يُلاحظ أن مؤشرات قضيب التوزيع C تتأثر بشكل كبير بمؤشرات الخط 3. وهذا متوقع، إذ سيتعطل قضيب التوزيع C في حال تعطل الخط 3 أو الخطين 1 و2 معًا. وبالتالي، يُعد تعطل الخط 3 حدثًا من الدرجة الأولى، بينما يُعد تعطل الخطين 1 و2 حدثًا من الدرجة الثانية.

2. تحليل أنماط الأعطال

في المثال السابق، حُسبت مؤشرات قضبان التوصيل باستخدام تقنية اختزال الشبكة. وبذلك، تُدمج المناطق الحرجة أو غير الموثوقة في عناصر مكافئة، ما يجعل تحديدها مستحيلاً. البديل هو فحص النظام ومقارنة قائمة أنماط الأعطال، أي انقطاعات المكونات التي يجب أن تتداخل لتسبب انقطاعًا في النظام. تُعتبر هذه الانقطاعات المتداخلة عناصر متوازية فعليًا، ويمكن دمجها باستخدام معادلات المكونات المتوازية. أي انقطاع من هذه الانقطاعات المتداخلة سيؤدي إلى فشل النظام، وبالتالي، فهي متصلة على التوالي. لذلك، يمكن تقييم مؤشرات النظام بتطبيق معادلة السلسلة السابقة على هذه الانقطاعات المتداخلة.

كمثال، انظر إلى الشبكة التالية في الشكل 9-8:



الشكل 9-8.

بيانات الشبكة معطاة في الجدول 9-4:

الجدول 9-4.

Component	λ (f/yr)	r (hr)
1	0.5	10
2	0.5	10
3	0.01	100
4	0.01	100

الحل:

(أ) باستخدام طريقة اختزال الشبكة: يؤدي دمج العنصرين 1 و3 على التوالي إلى:

$$\lambda_{1,3} = \lambda_1 + \lambda_3 = 0.51 \text{ f/yr}$$

$$r1,3 = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_3 r_3}{\lambda_{1,3}} = \frac{0.5x10 + 0.01x100}{0.51} = 11.76\ hr$$

$$U_{1,3} = \lambda_{1,3}\, r_{1,3} = 6 \text{ hr/yr}$$

ستكون مؤشرات المكونين 2 و4 متطابقة. إذن، مؤشرات نقطة التحميل هي:

$$\lambda_s = \lambda_{1,3}\, \lambda_{2,4}\, (r_{1,3} + r_{2,4}) / 8760 = 6.984 \times 10^{-4} \text{ f/yr}$$

$$r_s = \frac{r_{1,3}\ r_{2,4}}{r_{1,3} + r_{2,4}} = 5.88 \text{ hr}$$

$$U_s = \lambda_s\, r_s = 4.106 \times 10^{-3} \text{ hr/yr}$$

(ب) استخدام تحليل أنماط الفشل:

بشكل عام، بالنسبة للأنظمة المتوازية:

$$\lambda_p = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) / 8760 \quad ، \quad r_p = \frac{r_1\ r_2}{r_1 + r_2} \quad ، \quad U_p = \lambda_p\, r_p$$

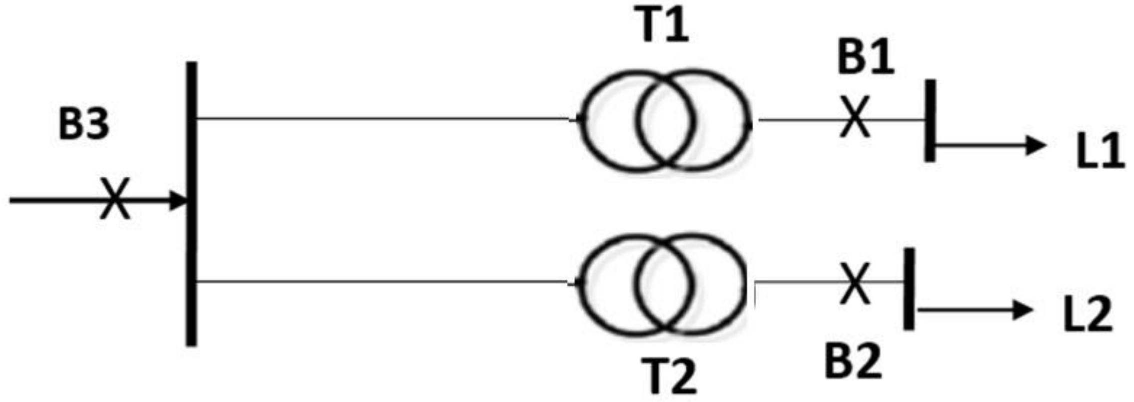
انقطاع متداخل Overlapping outage	λ (f/yr)	r (hr)	U (hr/yr)
1 & 2	$\frac{0.5\ x0.5(10+10)}{8760} = 5.7\text{x}10^{-4}$	5	$2.854\text{x}10^{-3}$
1 & 4	6.279×10^{-5}	9.091	5.708×10^{-4}
2 & 3	6.279×10^{-5}	9.091	5.708×10^{-4}
3 & 4	$2.283\text{x}10^{-6}$	50	$1.142\text{x}10^{-4}$
	$6.98\text{x}10^{-4}$	5.88	$4.11\text{x}10^{-4}$
	$\lambda_s = \sum \lambda$	$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s}$	$U_s = \sum U$

على الرغم من أن الطريقة الثانية أطول، إلا أنها توفر معلومات أكثر بكثير. فهي تُشير بوضوح إلى أن معدل الأعطال وعدم التوافر يعودان بشكل رئيسي إلى تداخل أعطال الخطين، بينما يعود متوسط مدة الانقطاع بشكل رئيسي إلى تداخل انقطاعات المحولات. هذه المعلومات ضرورية لتقييم المناطق الحرجة وتحديد المناطق التي تتطلب استثمارًا، وهي غير متوفرة في تقنية اختزال الشبكة.

8-9 وثوقية الشبكة مع إجراءات التبديل Network Reliability with switching action

في المناقشة السابقة، افترضنا أن حالة التشغيل (UP) للمكون هي حالته التشغيلية، وأن حالة التعطل (Down) هي الحالة التي يكون فيها المكون خارج الخدمة للصيانة (انقطاع دائم). غالبًا ما يكون هذا كافيًا للعديد من التطبيقات، ويعطي قيمًا دقيقة نسبيًا لوقت عدم التوفر أو وقت الانقطاع الفعلي (U). مع ذلك، قد يعطي قيمًا غير دقيقة لـ (λ) لأنه يتجاهل تسلسل الأحداث وتأثير تعطل المكون على المكونات السليمة؛ أي أنه يتجاهل إجراءات التبديل التي تحدث عند تعطل المكون.

ولتوضيح ذلك، ضع في اعتبارك الشبكة الموضحة في الشكل 9- 9 التالية التي سيتم فيها النظر فقط في أعطال المحولات.



الشكل 9-9 .

كان يُفترض سابقًا أنه إذا كانت أعطال المحولات هي السبب الوحيد للفشل، فإن مؤشرات موثوقية نقطة التحميل هي:

الحمل L1 : λ(T1)، r(T1)، U(T1)

الحمل L2 : λ(T2)، r(T2)، U(T2)

مع ذلك، سيؤدي حدوث عطل أرضي في المحول T1 إلى تشغيل قاطع الدائرة B3، مما يتسبب بالتالي في انقطاع التيار عن الحملين L1 وL2. بعد ذلك، يتم عزل المحول T1، وإغلاق قاطع الدائرة B3، وإعادة توصيل الحمل L2. لذا، يتعرض الحمل L1 لانقطاع دائم، ولا يُعاد توصيله إلا بعد إصلاح أو استبدال المحول (T1 (r1، بينما يتعرض الحمل L2 لانقطاع مؤقت، ويُعاد توصيله بعد انقضاء زمن التحويل s للمحول T1. وبالتالي، فإن مؤشرات موثوقية نقطة الحمل للحمل L2 هي:

$$\lambda(L_2) = \lambda(T_2) + \lambda(T_1)$$

$$U(L_2) = \lambda(T_2)\, r(T_2) + \lambda(T_1)\, s(T_1)$$

$$r(L_2) = U(L_2) / \lambda(L_2)$$

حيث يُمثل s() زمن التبديل أو العزل للمكون المعطل.

إذا كان معدلا الفشل متقاربين، فسيتم الحصول على قيم غير دقيقة لمعدل الفشل L2 في حال تجاهل عمليات التبديل. مع ذلك، بما أن $s \leq r$، فإن عدم الدقة في قيمة زمن الانقطاع السنوي (U) يكون عادةً ضئيلاً. كما أن متوسط مدة الانقطاع سيكون غير دقيق للغاية.

يتضح إذن أنه إذا لزم الحصول على المؤشرات الثلاثة بدقة أكبر، فيجب تضمين التبديل، واعتبار الحالات التالية: الحالة قبل العطل، والحالة مباشرةً بعد العطل، والحالة بعد التبديل.

مثال 9-5 :

لنفترض النظام الموضح في الشكل 9-10، ولنفترض أن معدل تعطل كل محول هو 0.1 عطل/سنة، ووقت إصلاحه 50 ساعة، ووقت تشغيله ساعتان.

الحل:

بالنسبة للنظام الموضح في الشكل 9-10،

(أ) لا يمكن عزله.

$\lambda(L_1) = \lambda(L_2) = \lambda(T_2) + \lambda(T_1) = 0.1+0.1 = 0.2$ عطل في السنة

$$U(L_1) = U(L_2) = \lambda(T_2)\, r(T_2) + \lambda(T_1)\, r(T_1)$$

$= 0.1x50 + 0.1x50 = 10$ ساعة في السنة

$$r(L_1) = r(L_2) = U(L_2) / \lambda(L_2) = 10/0.2 = 50 \text{ ساعة}$$

(ب) العزل ممكن:

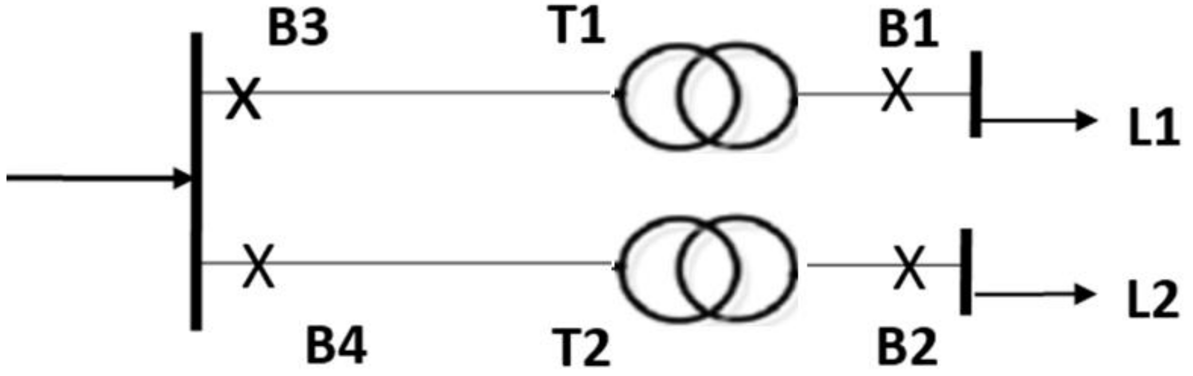
$$\lambda(L_1) = \lambda(L_2) = \lambda(T_2) + \lambda(T_1) = 0.1 + 0.1 = 0.2 \text{ عطل في السنة}$$

$$U(L_1) = U(L_2) = \lambda(T_2)\, r(T_2) + \lambda(T_1)\, s(T_1) = 0.1\text{x}50 + 0.1\text{x}2 = 5.2 \text{ ساعة في السنة}$$

$$r(L_1) = r(L_2) = U(L_2) / \lambda(L_2) = 5.2/0.2 = 26 \text{ ساعة}$$

المثال9-6:

كرر المثال 9-5 أعلاه للنظام الموضح في الشكل9-11.



الشكل 9-11.

الحل:

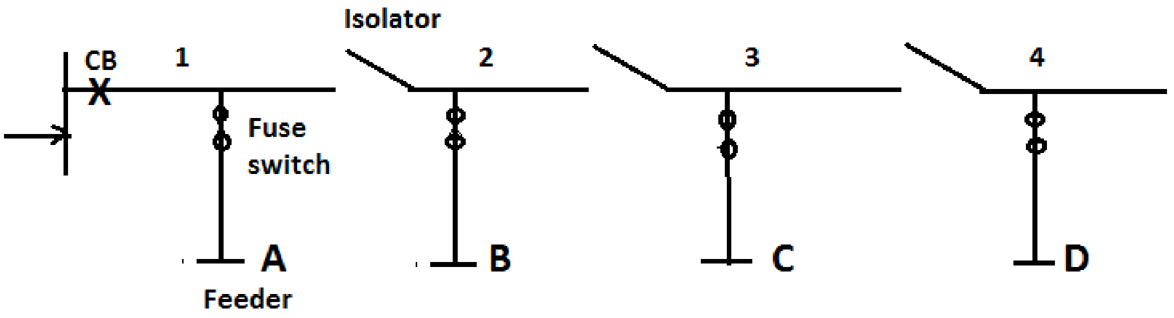
$$\lambda(L_1) = \lambda(L_2) = \lambda(T_1) = 0.1 \text{ عطل في السنة}$$

$$r(L_1) = r(L_2) = 50 \text{ ساعة}$$

$$U(L_1) = U(L_2) = \lambda(T_1)\, r(L_1) = 0.1\text{x}50 = 5 \text{ساعة}$$

تطبيق على شبكة التوزيع الشعاعية

تُعدّ مغذيات التوزيع الشعاعية أبسط أنواع الشبكات من حيث الحل، إذ يُمكن الاعتماد فيها على معيار الاستمرارية فقط. ولتوضيح تطبيق التقنيات السابقة، لنأخذ شبكة التوزيع الموضحة في الشكل 9-12 بعين الاعتبار، ولنأخذ في الحسبان فقط حالات الفشل من الدرجة الأولى.



الشكل 9-12.

لنفترض أن معدل فشل كل مغذي رئيسي هو 0.1 فشل / كم .سنة ومتوسط وقت الإصلاح 4 ساعات، وأن معدل فشل كل موزع جانبي هو 0.2 فشل / كم .سنة ومتوسط وقت الإصلاح 2 ساعات، وأن وقت عزل الأقسام يدويًا هو 0.5 ساعة، وأن طول كل قسم من أقسام المغذي هو 2 كم وطول كل موزع جانبي هو 1.5 كم.

جميع أعطال المغذيات ستؤدي إلى فتح قاطع الدائرة الرئيسي، بينما عطل الموزع الجانبي سيؤدي فقط إلى تشغيل مفتاح المصهر الخاص به. عند تعطل جزء من المغذي، يُفتح أقرب عازل ويُعاد توصيل قاطع الدائرة.بناءً على آلية التشغيل هذه، يمكن الحصول على جدول مؤشرات الوثوقية 9-4 التالي:

• معدل تعطل مغذي الجزء $\lambda = 0.1$ (عطل/كم.سنة) × 2 كم = 0.2 عطل/سنة.

• معدل تعطل الموزع الجانبي $\lambda = 0.2$ (عطل/كم.سنة) × 1.5 كم = 0.3 عطل/سنة.

جدول 9- 5 مؤشرات الوثوقية .

المكون المعطل Component failed	λ f/yr	نقطة الحمل A r(hr)	U(hr/yr)	نقطة الحمل B r(hr)	U(hr/yr	نقطة الحمل C r(hr)	U(hr/yr	نقطة الحمل D r(hr)	U(hr/yr
Section 1	0.2	4	0.8	4	0.8	4	0.8	4	0.8
Section 2	0.2	0.5	0.1	4	0.8	4	0.8	4	0.8
Section 3	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	4	0.8	4	0.8
Section 4	0.2	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	4	0.8
Lateral distributer	0.3	2	0.6	2	0.6	2	0.6	2	0.6
Total	1.1	1.55	1.7	2.18	2.4	2.82	3.1	3.45	3.8

حيث :

$$\lambda_{total} = \sum \lambda \quad , \quad U_{total} = \sum U \quad , r_{total} = \frac{U_{total}}{\lambda_{total}}$$

لو تم استخدام نموذج ذي حالتين وتجاهل عملية التبديل وانقطاعات التيار المؤقتة، لكان الجدول 9-5 المعدل التالي قد تم الحصول عليه:

الجدول 9-5 المعدل.

المكون المعطل	نقطة الحمل A			نقطة الحمل B			نقطة الحمل C			نقطة الحمل D		
Component failed	λ	r	U	λ	r	U	λ	r	U	λ	r	U
Section 1	0.2	4	0.8	0.2	4	0.8	0.2	4	0.8	0.2	4	0.8
Section 2	----	----	----	0.2	4	0.8	0.2	4	0.8	0.2	4	0.8
Section 3	----	----	----	----	----	----	0.2	4	0.8	0.2	4	0.8
Section 4	----	----	----	----	----	----	----	----	----	0.8	4	0.8
Lateral distributer	0.3	2	0.6	0.3	2	0.6	0.3	2	0.6	0.3	2	0.6
Total	0.5	2.8	1.4	0.7	3.14	2.2	0.9	3.33	3	1.1	3.45	3.8

يتضح إذن أن التحليل مباشر وبسيط. ويتضح أيضاً أن قيم U متقاربة، بينما قد تختلف قيم λ و r.

9-9 تكاليف نظام الطاقة **Power system costs**

هناك عدة تكاليف مرتبطة بتخطيط نظام الطاقة، ويمكن توضيحها في الأقسام التالية.

1. التكاليف الثابتة **Fixed cost**

تمثل التكاليف الثابتة التدفق النقدي في أي مرحلة من مراحل التخطيط، والناتج عن تكاليف تركيب وحدات توليد جديدة خلال فترة التخطيط. وتعتمد هذه التكاليف على الوضع المالي الحالي لشركة الكهرباء، ونوع وحجم وحدات التوليد، وتكلفة الوقت على رأس المال المستثمر خلال فترة التخطيط.

ويمكن حساب إجمالي التكاليف الثابتة للوحدة (الوحدات) التي يتم تركيبها على النحو التالي:

$$FC_T = \sum_t \sum_k (CAP_k \cdot CC_k \cdot NU_k)^t$$

حيث :

$CAP_k: unit\ capacity\ added\ to\ the\ system\ of\ type\ k$

$CC_k: capital\ cost\ of\ unit\ of\ type\ k\ (SR/kW)$

$NU_k: number\ of\ unit(s)\ added\ to\ the\ system\ of\ type\ k\ at\ each\ interval\ of\ time\ t.$

$t: interval\ period\ of\ time\ considered\ in\ the\ planning\ horiozon, \quad t = 1 \ldots T$

2. التكلفة المتغيرة **Variable cost**

تمثل التكلفة المتغيرة (VC) تكلفة الطاقة التي يوفرها النظام. وهي تتأثر بتغيرات الحمل، ونوع وحجم وحدات التوليد، وعدد ساعات التشغيل. كما ترتبط هذه التكاليف بتكاليف التشغيل والصيانة (الوقود، والصيانة الدورية، وقطع الغيار المؤقتة، ورواتب الموظفين، والأجور، والمصروفات المتنوعة) ويمكن تقييمها على النحو التالي:

$$VC_T = \sum_t \sum_k (\epsilon ES_k \cdot ESC_k \cdot NU_k)^t$$

حيث

ϵEsk : الطاقة المتوقعة التي توفرها الوحدة من النوع k؛

$ESCk$: الطاقة الموردة تكلفة الوحدة من النوع k (دولار/كيلوواط ساعة).

يمكن تقدير إجمالي تكاليف النظام total system costs (SCT) لخطة التوسع بأكملها عن طريق جمع جميع التكاليف الفردية المذكورة أعلاه في كل مرحلة من مراحل فترة التخطيط، كما هو موضح في المعادلة التالية:

$$SC_T = FC_T + VC_T$$

تكلفة انقطاع التيار الكهربائي Outage cost

تم عرض تكاليف انقطاع التيار الكهربائي، أي تكلفة الطاقة المتوقعة التي لم يتم توفيرها (ϵENS)، ومناقشتها سابقًا outage cost في القسم 5. إحدى طرق التقييم موضحة في [8]. لذلك، يتم تقدير تكلفة انقطاع التيار الكهربائي (OC) بضرب قيمة (ϵENS) في معدل تكلفة انقطاع التيار الكهربائي المناسب outage cost rate(OCR) ، كما يلي:

$$OC_T = \sum_t (\epsilon ENS \cdot OCR)^t$$

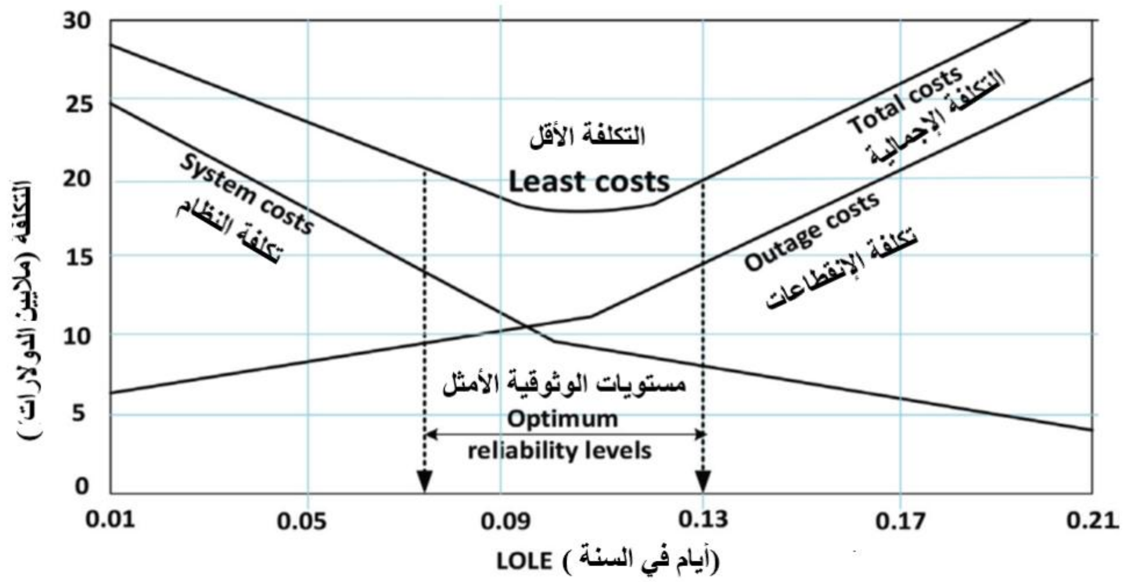
حيث ϵENS هي الطاقة المتوقعة غير الموردة (كيلوواط ساعة مفقودة)، وOCR هي معدل تكلفة انقطاع التيار الكهربائي بالدولار الأمريكي /كيلوواط ساعة.

أما التكلفة الإجمالية لتزويد المستهلكين بالطاقة الكهربائية فهي مجموع تكلفة النظام التي تزداد عمومًا مع زيادة موثوقية التيار الكهربائي للمستهلكين وتكلفة انقطاع التيار الكهربائي للمستهلكين التي تنخفض مع زيادة موثوقية النظام أو العكس. ويمكن التعبير عن هذه التكلفة الإجمالية للنظام (OSC) كما في المعادلة التالية:

$$OSC_T = SC_T + OC_T$$

يتمثل الدور البارز لتقدير تكلفة انقطاع التيار الكهربائي، كما هو موضح في المعادلة أعلاه، في تقييم قيمة وثوقية نظام الطاقة من خلال مقارنة هذه التكلفة (OC) مع حجم استثمار النظام (SC) للوصول إلى أقل تكلفة إجمالية للنظام والتي من شأنها تحديد مستوى موثوقية النظام الأنسب الذي يضمن استمرارية تدفق الطاقة وأقل تكلفة لإنتاجها.

كما هو موضح في الشكل 8، فإن إدراج تكاليف انقطاع التيار الكهربائي عن المستهلكين في نماذج الاستثمار الخاصة بخطط توسيع أنظمة الطاقة يمثل تحديًا كبيرًا للمخططين في الدول سريعة النمو. وتعود هذه الصعوبة بشكل أساسي إما إلى نقص سجلات النظام الخاصة ببيانات انقطاع التيار الكهربائي، ومعدل الأعطال، وتكرارها، ومدة الإصلاح، وما إلى ذلك، أو إلى عدم إجراء استطلاعات رأي للمستهلكين لتقدير تأثير وشدة هذه الانقطاعات من حيث القيمة المالية.



الشكل 9-13 تغيرات مستويات LOLE مع التكاليف.

الفصل 10

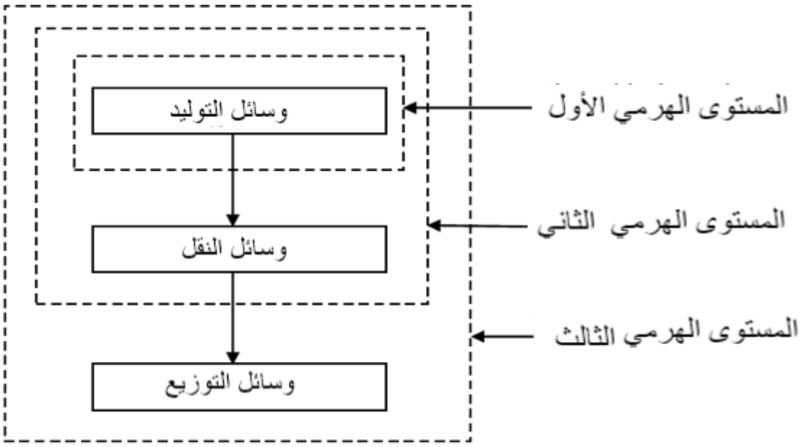
تحليل وثوقية أنظمة التوزيع

RELIABILITY ANALYSIS OF DISTRIBUTION SYSTEMS

1-10 مقدمة

يعتمد المجتمع الحديث اعتمادًا كبيرًا على كفاءة تشغيل أنظمة الطاقة الكهربائية. إن أي انقطاع بسيط في التيار الكهربائي يكون له تأثير بالغ على المستهلكين . ويتوقع المستهلكون توفر الطاقة الكهربائية على مدار الساعة طوال أيام الأسبوع دون أي انقطاع. ومن الواضح أن انقطاع التيار الكهربائي قد يُدمر الأعمال للمستهلكين . ومدى اعتماد الدول المتقدمة في العالم على إمدادات الطاقة الكهربائية. في بدايات استخدام الكهرباء، كانت تُعتبر من الكماليات، أما اليوم فهي سلعة ثمينة للغاية. ورغم انخفاض عدد حالات انقطاع التيار الكهربائي في الدول المتقدمة بشكل ملحوظ، لا تزال الدول النامية تواجه مشكلة انقطاع التيار المتكرر نسبيًا.

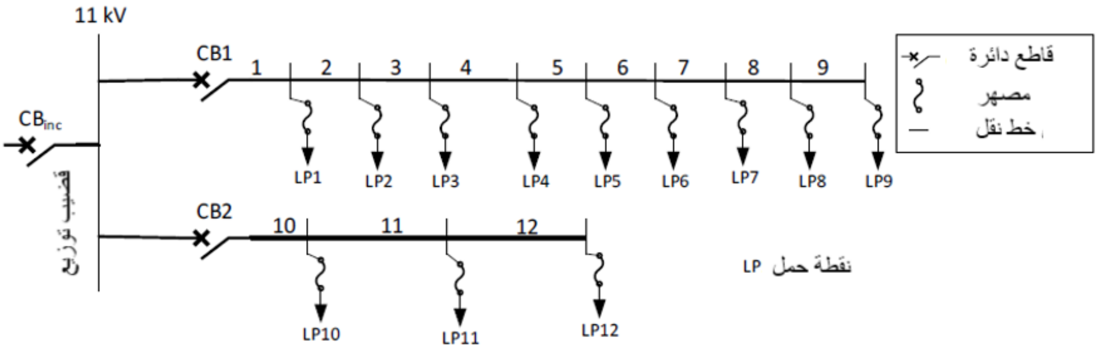
على مدى العقود القليلة الماضية، حظيت أنظمة التوزيع باهتمام أقل بكثير من أنظمة التوليد، وذلك فيما يتعلق بنمذجة الوثوقية وتقييمها. وتتمثل الأسباب الرئيسية لذلك في أن محطات التوليد تتطلب استثمارات رأسمالية ضخمة، وأن عدم كفاية التوليد قد يؤدي إلى عواقب كارثية واسعة النطاق على المجتمع والبيئة. وبالتالي، تم التركيز بشكل كبير على ضمان كفاية هذا الجزء من نظام الطاقة وتلبية احتياجاته. ويبين الشكل 10-1 المستويات الهرمية في تقييم الوثوقية.



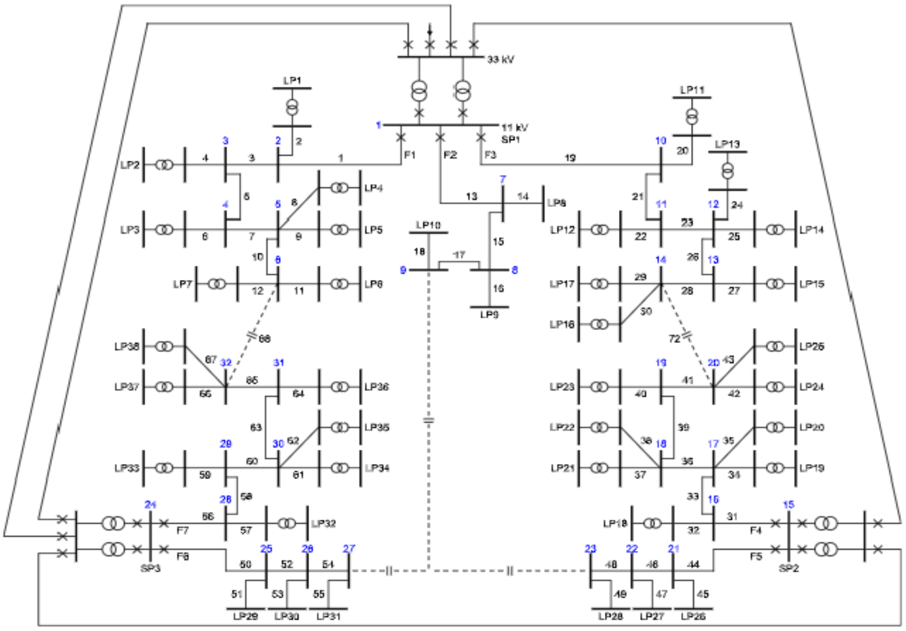
الشكل 10-1 المستويات الهرمية في تقييم الموثوقية.

2-10 نظام توزيع القدرة الكهربائية

يستقبل نظام توزيع القدرة الكهربائية الطاقة من الشبكة الرئيسية عبر خط نقل واحد أو أكثر، ويوزعها على فئات مختلفة من مستهلكي الكهرباء. يوضح الشكل 10-2 نظام توزيع شعاعي نموذجي يزود عملاء المناطق الريفية بالطاقة. بينما يوضح الشكل 10-3 نظام توزيع بشبكة متشابكة يخدم عادةً عملاء المناطق الحضرية. يُعرف كلا النظامين بنظام توزيع الكهرباء، ويخدمان شريحة واسعة من المستهلكين وعددًا كبيرًا منهم. عادةً ما تكون مغذيات التوزيع في المناطق الحضرية قصيرة، بينما تكون مغذيات التوزيع في المناطق الريفية طويلة ومتباعدة. وغالبًا ما تُبنى مغذيات التوزيع في المناطق الحضرية مزودة بإمكانية نقل الأحمال من المغذيات المجاورة في حالات الطوارئ أو الصيانة. يعتمد اختيار نظام التوزيع في منطقة ما على عوامل فنية واقتصادية وبيئية وجغرافية، ويُسترشد بطبيعة المستهلكين وأنواع الأحمال المراد تزويدها.



الشكل 10-2 توزيع ريفي نموذجي.



الشكل 10-3 نظام توزيع حضري نموذجي.

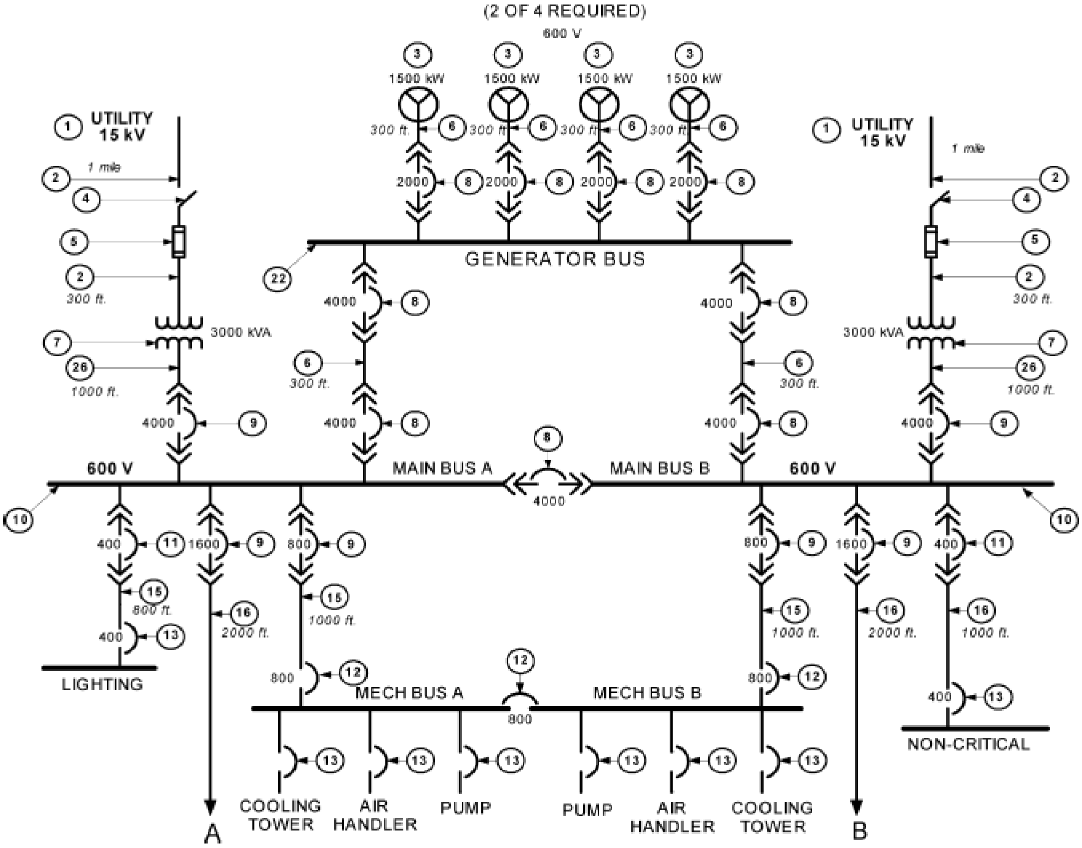
في الماضي، كانت جميع أنظمة القدرة الكهربائية تعمل كأنظمة متكاملة رأسيًا، حيث كانت مرافق التوليد والنقل والتوزيع مملوكة لجهة واحدة، عادةً الحكومة. ومنذ ذلك الحين، تم تحرير العديد من أنظمة الكهرباء حول العالم وإعادة هيكلتها للعمل في أسواق الكهرباء. في السوق المحررة، تُملك كيانات منفصلة مرافق مختلفة داخل نظام الطاقة. هذه الأنظمة مملوكة لكيانات خاصة بهدف الربح من سوق الكهرباء، وهذه الكيانات مترددة في الاستثمار بنية التوزيع التحتية. تقوم هيئة تنظيم الكهرباء في هذه المناطق بتطبيق لوائح مختلفة لحماية العملاء من انقطاع التيار الكهربائي عن طريق جذب استثمار كافٍ في شبكة التوزيع.

مع ظهور الشبكات الذكية، ازداد تعقيد تصميم وتكوين وتشغيل شبكات التوزيع، مما يعزز استخدام موارد الطاقة الموزعة وتقنيات الاتصالات. وقد استدعت هذه التغيرات المستمرة استراتيجيات مختلفة لتشغيل وحماية والتحكم في شبكات التوزيع، الأمر الذي يؤثر بشكل مباشر على وثوقية وجودة إمدادات الطاقة. ومن المتوقع أن تُسهم هذه التغيرات في رفع مستوى وثوقية شبكات التوزيع وخفض تكاليف تشغيلها. وبفضل دمج نظام الاتصالات في شبكات التوزيع، يُتوقع تعزيز الوعي الظرفي وتحسين استراتيجيات الحماية. ويُعدّ تحقيق التوازن الأمثل بين تكلفة رأس المال وتكلفة التشغيل وتكلفة الصيانة، بالإضافة إلى تحسين الوثوقية الناتجة عن تبني التقنيات الجديدة، من أهم أولويات شركات المرافق في شبكات التوزيع الحديثة. وتُعدّ القدرة على تحديد الفوائد الاقتصادية وفوائد الوثوقية لتبني التقنيات والعمليات الجديدة بدقة أمرًا بالغ الأهمية في اتخاذ القرارات المتعلقة بنشر التقنيات الذكية، وإنشاء خطوط جديدة، وتعزيز الخطوط القائمة، وتخطيط الصيانة، والاستثمار في قطع الغيار.

يمتلك العديد من العملاء الصناعيين والتجاريين الكبار شبكات توزيع طاقة خاصة بهم، تستقبل الطاقة إما من شبكة توزيع تابعة لشركة الكهرباء أو من شبكة الطاقة الرئيسية. تُعرف هذه الأنواع من شبكات التوزيع بشبكات التوزيع الصناعية والتجارية (ICDS) industrial and commercial distribution systems. يوضح الشكل 10-4 نموذجًا لشبكة ICDS، مأخوذًا من كتاب IEEE الذهبي. وتُسبب انقطاعات التيار الكهربائي عواقب وخيمة على كبار عملاء الكهرباء الصناعيين والتجاريين، ولذلك غالبًا ما يتم تزويدهم بمغذيات متعددة من شركة الكهرباء، ومولدات احتياطية، ووحدات تزويد طاقة غير منقطعة (UPS)، وبطاريات تخزين.

في أنظمة التوزيع المتكاملة للطاقة (ICDS)، تم تجهيز آلية التحويل لنقل الأحمال بين مختلف موردي الطاقة وأنظمة توليد الطاقة الاحتياطية لضمان الحد الأدنى من انقطاع التيار الكهربائي الناتج عن الأعطال والاضطرابات. توفر معايير IEEE 493 وIEEE P3001.5 إرشادات لتصميم نظام ICDS موثوق مع أمثلة على التكوينات والأجهزة المختلفة. يعتمد اختيار تكوين معين في نظام

ICDS على عوامل مثل تكاليف رأس المال والتشغيل والصيانة، واحتياجات العملاء من حيث الوثوقية وتكاليف انقطاع التيار، ووثوقية مصدر الطاقة الرئيسي. في نظام ICDS، تنشأ الانقطاعات إما من مصدر الطاقة الرئيسي أو من عطل في المكونات أو العمليات داخل شبكة ICDS. ولتقليل انقطاعات التيار الكهربائي، يولي مالكو أنظمة ICDS اهتمامًا كبيرًا للتصميم والتركيب والصيانة والتحديثات المناسبة لشبكاتهم، بالإضافة إلى تركيب مغذيات بديلة وأنظمة توليد طاقة احتياطية.



الشكل 10-4 نموذج لشبكة التوزيع الصناعية والتجارية ICDS.

إن مصطلح "الوثوقية" هو مصطلح واسع المعنى. لكن بشكل عام، تشير الوثوقية إلى قدرة النظام على أداء وظيفته الموكلة إليه، حيث تساعد الخبرة في تكوين تقديرات مسبقة للأداء المستقبلي. وفيما يلي تعريف مفيد يوضح الأبعاد المختلفة لهذا المفهوم:

يقيس تقييم وثوقية نظام التوزيع ويتنبأ بقدرة شبكة الطاقة على توفير الكهرباء، وهو ما يمثل حوالي 80% من إجمالي انقطاعات التيار الكهربائي لدى المستهلكين. ويتضمن ذلك تقييم الأداء السابق والتنبؤ بالأداء المستقبلي باستخدام طرق تحليلية أو محاكاة مثل محاكاة مونت كارلو. وتشمل

الأساليب الرئيسية تقييم أعطال نقاط التحميل، ومؤشرات النظام الكلية، ومراعاة معدلات الأعطال المتغيرة مع الزمن.

يُعدّ نظام التوزيع رخيصًا نسبيًا، وتكون انقطاعاته ذات تأثير محلي محدود للغاية. ولذلك، لم يُبذل جهد يُذكر في التقييم الكمي لمدى كفاية التصاميم البديلة المختلفة والتعزيزات. من جهة أخرى، يُظهر تحليل إحصاءات أعطال العملاء في معظم شركات الكهرباء أن نظام التوزيع يُسهم بشكل كبير في عدم توفر التيار الكهربائي للعميل. ويتضح ذلك من خلال الإحصاءات الواردة في الجدول 10-1، والتي تتعلق بشركة توزيع محددة في العالم . تُؤكد إحصاءات كهذه على ضرورة الاهتمام بتقييم وثوقية أنظمة التوزيع، وتقييم مزايا مختلف خطط التعزيز المتاحة للمخطط كميًا، وضمان استخدام الموارد الرأسمالية المحدودة لتحقيق أكبر قدر ممكن من الوثوقية والتحسين في النظام. وتشمل الجوانب الرئيسية لتقييم وثوقية منظومة التوزيع الكهربائية ميأتي :

- الأداء التاريخي: تقوم شركات الكهرباء بحساب المؤشرات بناءً على البيانات السابقة لقياس الوثوقية.
- التقييم التنبؤي: يُستخدم لتوقع الأداء المستقبلي وتقييم تحسينات تصميم النظام.

يجب مراعاة عدة جوانب أخرى عند تقييم وثوقية أنظمة التوزيع:

أولاً، على الرغم من أن خطة تعزيز معينة قد تكون غير مكلفة نسبيًا، إلا أن مبالغ طائلة تُنفق إجمالاً على هذه الأنظمة.

ثانيًا، من الضروري ضمان توازن معقول في وثوقية مختلف مكونات نظام الطاقة، أي التوليد والنقل والتوزيع.

ثالثًا، يتوفر عدد من البدائل لمهندس التوزيع لتحقيق وثوقية مقبولة لدى العملاء، بما في ذلك خطط تعزيز بديلة، وتخصيص قطع الغيار، وتحسينات في سياسة الصيانة، وسياسات تشغيل بديلة. ولا يمكن مقارنة مزايا هذه البدائل كميًا، ولا مقارنة تأثيرها لكل وحدة نقدية مُنفقة، دون استخدام تقييم كمي للوثوقية.

لقد أصبحت هذه المشكلات معروفة تمامًا في الوقت الحاضر ، ويتزايد عدد شركات الكهرباء العامة في جميع أنحاء العالم التي تُدخل وتستخدم بشكل روتيني تقنيات الوثوقية الكمية. وفي الوقت نفسه، يجري باستمرار تطوير وتحسين تقنيات تقييم إضافية، كما يتضح من العدد المتزايد بسرعة للأبحاث المنشورة في هذا المجال. ويبين الجدول 10-1 إحصائيات نموذجية عن عدم توافر العملاء.

ليس من السهل تحديد السنة التي بدأ فيها الاهتمام بالتقييم الكمي لوثوقية أنظمة التوزيع، لأن التقنيات المستخدمة في البداية كانت تعتمد، مع تعديلات طفيفة أو معدومة، على الطرق الكلاسيكية لأنظمة التوالي والتوازي. ومع ذلك، فقد حدثت أكبر دفعة في عامي 1964-1965، عندما نُشرت

الجدول 10-1 إحصائيات نموذجية عن عدم توافر العملاء .

المساهم	متوسط عدم التوفر لكل عميل في السنة (دقائق)	(%)
توليد/نقل الطاقة	0.5	0.5
132 kV	2.3	2.4
66 كيلوفولت و33 كيلوفولت	8.0	8.3
11كيلو فولت و 6.6 كيلو فولت	58.8	60.7
فولتية منخفضة	11.5	11.9
انقطاعات مجدولة	15.7	16.2
المجموع	96.8 دقائق	100.0

مجموعة من الأوراق البحثية التي اقترحت تقنية تعتمد على معادلات تقريبية لتقييم معدل ومدة انقطاعات التيار الكهربائي. وقد شكلت هذه التقنية الأساس ونقطة الانطلاق لمعظم التطورات اللاحقة والأكثر حداثة. و منذ هذه التطورات الأولية، نُشرت العديد من الأبحاث التي حسّنت بشكل كبير التقنيات الأساسية، والتي تسمح بنمذجة واقعية ومفصلة للغاية لشبكات أنظمة الطاقة. والأبحاث المتاحة في هذا المجال كثيرة جدًا ويصعب حصرها بشكل فردي .

10-3 أهمية تقييم وثوقية نظام التوزيع

من بين القضايا الرئيسية التي تواجه شركات الكهرباء في سوق الكهرباء التنافسي اليوم، الضغط للحفاظ على استقرار الأسعار وتوفير الكهرباء بجودة ووثوقية كافيتين. وتُدرك شركات الكهرباء بشكل متزايد أن مستوى وثوقية الإمداد المخطط له والمصمم في النظام يجب أن يتطور بعيدًا عن المستويات المحددة أساسًا بناءً على إطار تقني باستخدام معايير حتمية، نحو تحقيق توازن بين تقليل التكاليف وتحقيق مستوى مستدام من شكاوى العملاء.

يجب أن يشمل تقييم تكلفة الحفاظ على مستوى معين من وثوقية الإمداد، أو إجراء تغييرات تدريجية فيه، ليس فقط تكلفة شركة الكهرباء لتوفير هذه الوثوقية، والخسائر المحتملة في الإيرادات أثناء انقطاع التيار الكهربائي، بل أيضًا تكاليف الانقطاع التي يتكبدها العملاء المتضررون أثناء انقطاع التيار الكهربائي. ويشكل تحليل التكلفة والعائد هذا محور تخطيط الوثوقية القائم على القيمة. يوفر تخطيط الوثوقية القائم على القيمة إطارًا منطقيًا ومتسقًا للإجابة على السؤال الاقتصادي الأساسي

حول مدى كفاية الوثوقية من وجهة نظر العملاء، وأين ينبغي لشركة الكهرباء إنفاق ميزانيتها المخصصة للوثوقية لتحسين الكفاءة وتلبية احتياجات العملاء من الكهرباء بأقل تكلفة. وتُعد التكاليف التي يتحملها العملاء والمرتبطة بمستويات وثوقية الخدمة المختلفة عوامل مهمة لا يمكن تجاهلها.

يجب، بالتالي، إدراج اعتبارات صريحة لتكاليف انقطاع التيار الكهربائي عن العملاء عند وضع أهداف وثوقية الإمداد، وعند تقييم المقترحات البديلة لتحديث الشبكة وصيانتها، وتصميم النظام، وذلك ضمن عملية تخطيط النظام وتصميمه. يقدم هذا الفصل لمحة موجزة عن ممارسات التخطيط الحتمية الحالية في تخطيط أنظمة توزيع القدرة الكهربائية بصورة مرضية ، ويطرح نهجًا احتماليًا قائمًا على قيمة العميل لتخطيط متطلبات التغذية البديلة لشبكات التوزيع الهوائية.

يتم حاليًا تحديد مستويات وثوقية الإمداد المقبولة بمقارنة مؤشرات تكرار الانقطاع ومدته الفعلية مع أهداف محددة مسبقًا. ويتضمن هذا النهج تصور مستوى رضا العملاء عن انقطاع الإمداد. وهذا النوع من معايير الوثوقية الضمنية غير كافٍ لتقييم جدوى الاستثمارات الرأسمالية المقترحة لتحقيق تحسينات تُحسّن كفاءة المرافق. لذا، من البديهي أنه لا يمكن تطبيق القواعد العامة والمعايير المبهمة بشكل متسق على حجم الاستثمارات الرأسمالية الهائل وقرارات التشغيل والصيانة التي تتخذها شركات الكهرباء بشكل روتيني. ويتمثل الأثر النهائي في احتمال سوء تخصيص الموارد داخل أنظمة التوزيع.

لتوفير وسيلة عقلانية ومتسقة لاتخاذ قرارات رشيدة بشأن ضرورة تغيير مستويات وثوقية الإمداد التي يواجهها عملاء شركات الكهرباء في منطقة خدمة معينة، يلزم وضع نماذج لعوامل قابلة للقياس الكمي بخلاف خسائر إيرادات الشركات نفسها. وعلى وجه الخصوص، يجب دمج النمذجة الصريحة لتكاليف أضرار العملاء عند وضع معايير وثوقية الإمداد في ممارسات التخطيط المعتادة.

تحاول منهجية تخطيط الوثوقية القائمة على القيمة تحديد الحل الأمثل من حيث التكلفة، حيث تُحدد التكاليف على أنها مجموع تكلفة الاستثمار بالإضافة إلى تكلفة التشغيل والصيانة، بالإضافة إلى تكاليف انقطاع الخدمة عن العملاء. عادةً ما تُحدد نقطة التكلفة الدنيا هذه بشرط الهامشية، حيث تكون التكلفة الهامشية لتحسين الوثوقية مساوية للفائدة الهامشية، وهي الانخفاض المتوقع في تكاليف أضرار العملاء نتيجة الاستثمار الهامشي. يقدم هذا الفصل لمحة موجزة عن الممارسات الحالية لشركات الكهرباء في تخطيط التوزيع. على وجه الخصوص، يتم تفصيل معايير التخطيط القطعية المستخدمة في تخطيط متطلبات التغذية البديلة وتصميم الشبكات الهوائية. كما يتم توضيح نهج تخطيط بديل للمغذيات احتمالي، ذي قيمة مضافة للعملاء، والذي يمكن أن يُكمل المعايير القطعية الحالية، من خلال نظام مثال عددي.

4-10 معايير تخطيط وتصميم شبكات التوزيع الحالية

المعايير الأساسية لتخطيط وتصميم شبكات التوزيع التي تستخدمها معظم شركات الكهرباء هي الحمل والفولتية . ومن الجدير بالذكر أن شركات الكهرباء دأبت على مراعاة الوثوقية بشكل نوعي في تخطيط وتصميم أنظمتها. كما تُعتبر الخسائر و البيئة من المعايير الثانوية لدى بعض شركات الكهرباء . وقد وُضعت معايير التخطيط من قِبل شركات الكهرباء ، استنادًا إلى مجموعة من الاعتبارات، بما في ذلك الممارسات الصناعية، وقوانين الكهرباء والبناء، وتصنيفات معدات الشركات المصنعة، والقواعد الخبرة العملية المستمدة من الخبرة التشغيلية طويلة الأمد.

1-4-10 جمع بيانات انقطاع التيار الكهربائي والإبلاغ عنها

تمتلك جميع شركات الكهرباء تقريبًا في معظم الدول نوعًا من قواعد البيانات المحوسبة ونظامًا للإبلاغ عن انقطاعات التيار الكهربائي لتسجيل عناصر البيانات الرئيسية المتعلقة بأعطال المكونات والمغذيات، وانقطاعات التيار الكهربائي لدى العملاء. ويتم تحديد انقطاعات التيار الكهربائي لدى العملاء من خلال وقت حدوثها ومدتها، والظروف الجوية، والأسباب التي يمكن تصنيفها عمومًا إلى أسباب مُخطط لها، وأسباب متعلقة بالمعدات، وأعطال، وأشجار، وأجسام غريبة، وخطأ بشري، وبرق، وإمدادات، وما إلى ذلك. وعادةً ما تُدخل سجلات الخبرة التشغيلية الميدانية في قاعدة بيانات، ويتم إنشاء عدد من التقارير.

2-4-10 العوامل المؤثرة في التقييم

- تقادم المكونات: مراعاة معدلات الأعطال المتغيرة بمرور الوقت لتقييم أكثر دقة للأنظمة القديمة.
- ظروف التشغيل: مراعاة البيئات المعقدة والظروف الجوية القاسية.
- تكوين النظام: تحليل التصاميم الشعاعية والحلقية (الشبكة الرئيسية الحلقية).

3-4-10 فوائد تقييم وثوقية شبكات التوزيع

1. تحديد نقاط الضعف في شبكة التوزيع.
2. تحسين جداول الصيانة والاستثمارات الرأسمالية.
3. تعزيز رضا العملاء وتلبية المتطلبات التنظيمية.

عادةً، يُعتبر نظام التوزيع ذو الشبكة الرئيسية الحلقية أكثر موثوقية من التكوينات الأخرى، وفقًا للكتب المنهجية (Testbook).

10-5 الطرق والمعايير الحتمية لتقييم وثوقية أنظمة التوزيع

DETERMINISTIC CRITERIA

10-5-1 تقييم نظام التوزيع الشعاعي

تعتمد التقنيات اللازمة لتحليل نظام التوزيع على نوع النظام قيد الدراسة وعمق التحليل المطلوب. يتناول هذا الفصل تقنيات التقييم الأساسية، وهي كافية تمامًا لتحليل الأنظمة الشعاعية البسيطة. يوسع الفصل 12 هذه التقنيات الأساسية لتشمل تقييم الأنظمة المتوازية والمتشابكة، وإضافة جوانب نمذجة أكثر دقة.

أساليب التقييم

يتكون نظام التوزيع الشعاعي من مجموعة من المكونات المتصلة على التوالي، بما في ذلك الخطوط، والكابلات، والمفاتيح (أو العوازل)، وقضبان التوزيع، وما إلى ذلك. يحتاج المستهلك المتصل بأي نقطة تحميل في هذا النظام إلى أن تكون جميع المكونات بينه وبين نقطة التغذية قيد التشغيل. وبالتالي، يمكن تطبيق مبدأ الأنظمة المتصلة على التوالي، الذي نوقش في الفصل وقد تبين أن معايير الموثوقية الأساسية الثلاثة، وهي متوسط معدل الفشل (ʎs)، ومتوسط زمن الانقطاع (rs)، ومتوسط زمن الانقطاع السنوي (Us)، تُعطى بالعلاقة التالية:

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i \qquad (10.1)$$

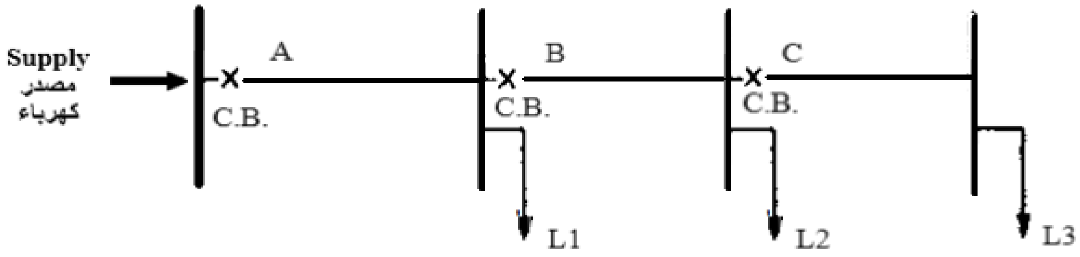
$$U_s = \sum_i \lambda_i \ r_i \qquad (10.2)$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i \ r_i}{\sum_i \lambda_i} \qquad (10.3)$$

لنفترض نظامًا شعاعيًا بسيطًا كما هو موضح في الشكل 10-5 معدلات الأعطال المفترضة وأوقات الإصلاح لكل خط من الخطوط A وB وC موضحة في الجدول 10-2 ، ومؤشرات وثوقية نقطة التحميل موضحة في الجدول10-3.

يوضح هذا المثال العددي السمة النموذجية والمقبولة عمومًا للنظام الشعاعي، وهي أن العملاء المتصلين بالنظام الأبعد عن نقطة التغذية يميلون إلى المعاناة من أكبر عدد من الانقطاعات وأكبر

قدر من عدم التوافر. مع ذلك، هذه ليست سمة عامة، كما سيتبين في أقسام لاحقة من هذا الفصل. لنفترض أن تعطل عناصر الخط A وB وC عبارة عن دوائر مفتوحة بسيطة بدون تأثيرات مركبة، أي أن تعطل عنصر الخط C لا يؤثر على الخط LI أو L2. وهذا يُعادل افتراض عزل تام للأعطال على عناصر الخط A وB وC بواسطة قواطع الدائرة الموضحة في الشكل 10-5.



الشكل 10-5 .

الجدول 10-2 بيانات مكونات النظام الموضح في الشكل الشكل 10-5.

الخط	λ (عطل / سنة)	r (ساعات)
A	0.20	6.0
B	0.10	5.0
C	0.15	8.0

الجدول 10-3 مؤشرات وثوقية نقطة التحميل لنظام الشكل 10-5.

نقطة الحمل	λ_L (عطل / سنة)	r_L (ساعات)	U_L (ساعات / سنة)
L1	0.20	6.0	1.2
L2	0.30	5.7	1.7
L3	0.45	6.4	2.9

10-5-2 مؤشرات الوثوقية المستخدمة في الطرق الحتمية

إن مؤشرات الوثوقية التي تم تقييمها آنفاً باستخدام المفاهيم الكلاسيكية هي المؤشرات الثلاثة الرئيسية: متوسط معدل الفشل، ومتوسط مدة الانقطاع، ومتوسط عدم التوافر السنوي أو متوسط وقت الانقطاع السنوي. وسيُشار إلى هذه المؤشرات عمومًا في هذا الكتاب فقط باسم معدل الفشل،

ومدة الانقطاع، ووقت الانقطاع السنوي. مع ذلك، تجدر الإشارة إلى أنها ليست قيمًا حتمية، بل هي القيم المتوقعة أو المتوسطة لتوزيع احتمالي أساسي، وبالتالي لا تمثل إلا متوسط القيم على المدى الطويل. وبالمثل، سيتم حذف كلمتي "متوسط" أو "متوقع" عمومًا من جميع المؤشرات الأخرى التي سيتم وصفها، ولكن تجدر الإشارة مرة أخرى إلى أن هذه الصفة مضمنة دائمًا في استخدام هذه المصطلحات.

- على الرغم من الأهمية الجوهرية للمؤشرات الثلاثة الرئيسية، إلا أنها لا تقدم دائمًا تمثيلًا كاملًا لسلوك النظام واستجابته. على سبيل المثال، سيتم تقييم نفس المؤشرات بغض النظر عما إذا كان عميل واحد أو 100 عميل متصلين بنقطة الحمل، أو ما إذا كان متوسط الحمل عند نقطة التحميل 10 كيلوواط أو 100 ميغاواط. ولبيان مدى خطورة أو أهمية انقطاع النظام، يمكن تقييم مؤشرات وثوقية إضافية، ويتم ذلك بشكل متكرر. وتُعرَّف المؤشرات الإضافية الأكثر شيوعًا في الفقرات التالية.

3-5-10 مؤشرات الوثوقية القائمة على المستهلكين

تُعدّ المتوسطات التي تُعطي وزنًا متساويًا لكل مستهلك للطاقة الكهربائية من مؤشرات الوثوقية الأكثر استخدامًا. وتحظى هذه المؤشرات بشعبية لدى شركات الكهرباء ، حيث إن المستهلك السكني الصغير لا يقل أهمية عن المستهلك الصناعي الكبير. وبغض النظر عن القيود التي قد تشوبها، تُعتبر هذه المؤشرات عمومًا تقنيات مقبولة تُظهر مقاييس كافية للوثوقية. بل إنها تُستخدم غالبًا كمعايير مرجعية للوثوقية وأهداف للتحسين . وتشمل صيغ المؤشرات القائمة على المستهلكين(العملاء) ما يلي:

- مؤشر متوسط تكرار انقطاعات النظام (SAIFI) :

System average interruption frequency index

يُعدّ مؤشر SAIFI مقياسًا لعدد مرات انقطاع الخدمة المستمرة التي قد يتعرض لها العميل العادي خلال عام. ويمكن تعريف هذا المقياس على النحو التالي:

SAIFI = (إجمالي عدد مرات انقطاع الخدمة للمستهلكين / إجمالي عدد المستهلكين الذين يتم خدمتهم)

أي إن مؤشر SAIFI هو متوسط عدد الانقطاعات لكل مستهلك مخدَّم. ويُستخدم مؤشر متوسط تكرار انقطاعات النظام (SAIFI) عادةً كمؤشر وثوقية من قِبل شركات الكهرباء. يقيس هذا المؤشر متوسط عدد مرات انقطاع التيار الكهربائي لدى أحد عملاء النظام خلال السنة أو خلال فترة زمنية محددة. ويُحسب مؤشر SAIFI عادةً على أساس سنوي أو شهري. ويُحسب كالتالي:

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i}$$

حيث

λ_iهو معدل الفشل و N_i هو عدد المستهلكين للموقع.

تتسبب عوامل عديدة في انقطاع التيار الكهربائي، بما في ذلك الأحوال الجوية، وأنماط الغطاء النباتي، وممارسات شركات الكهرباء. ويمكن لشركات الكهرباء الإبلاغ عن مدة الانقطاع في حالات الكوارث الكبرى (مثل العواصف الثلجية أو الأعاصير)، أو في غيابها، أو كليهما. ويُقاس مؤشر انقطاع التيار الكهربائي (SAIFI) بوحدات الانقطاعات لكل مشترك. وفقًا لمعيار IEEE 1366-1998، فإن القيمة المتوسطة لشركات الكهرباء في أمريكا الشمالية تبلغ حوالي 1.10 انقطاع لكل مستهلك.\

- مؤشر متوسط مدة انقطاعات النظام (SAIDI)

System average interruption duration index

يُعدّ مؤشر SAIDI مقياسًا لعدد ساعات انقطاع الخدمة التي سيواجهها المستهلك العادي خلال عام. بالنسبة لعدد ثابت من المستهلكين ، ويمكن تحسين مؤشر SAIDI عن طريق تقليل عدد الانقطاعات أو تقليل مدة هذه الانقطاعات. وبما أن كلا الأمرين يعكس تحسينات في الوثوقية، فإن انخفاض مؤشر SAIDI يشير إلى تحسن في الوثوقية. ويمكن تعريف هذا المقياس على النحو التالي:

SAIDI = إجمالي مدة انقطاعات المستهلكين / إجمالي عدد المستهلكين (ساعة لكل مستهلك)

- مؤشر متوسط مدة انقطاع الخدمة (CAIDI)

Customer average interruption duration index

مؤشر CAIDI هو مقياس لمتوسط مدة انقطاع الخدمة، ويُستخدم كمقياس لزمن استجابة شركة الكهرباء لحالات الطوارئ في النظام. يمكن تحسين مؤشر CAIDI بتقليل مدة الانقطاعات، ولكن

يمكن أيضًا تقليله بزيادة عدد الانقطاعات القصيرة. وبالتالي، فإن انخفاض مؤشر CAIDI لا يعكس بالضرورة تحسنًا في وثوقية النظام. يمكن تعريف هذا المقياس على النحو التالي:

CAIDI = إجمالي مدة انقطاعات المستهلكين / إجمالي عدد انقطاعات المستهلكين (ساعة لكل مستهلك)

يقيس مؤشر متوسط مدة انقطاع الخدمة (CAIDI) متوسط مدة انقطاع الخدمة ضمن فئة العملاء الذين تعرضوا لانقطاع خدمة مستمر واحد على الأقل.

يُعدّ مؤشر متوسط مدة انقطاع التيار الكهربائي لدى المستهلك (CAIDI) مؤشرًا شائع الاستخدام لقياس وثوقية الطاقة الكهربائية لدى شركات الكهرباء.[وهو مرتبط بمؤشري SAIDI وSAIFI، ويتم حسابه على النحو التالي:

$$\text{CAIDI} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i}$$

λ_iهو معدل الفشل وN_i هو عدد العملاء للموقع. و U_i هو وقت الانقطاع السنوي للموقع i.

ويُقاس مؤشر CAIDI بوحدات زمنية، غالباً بالدقائق أو الساعات. ويُقاس عادةً على مدار عام، ووفقاً لمعيار IEEE 1366-1998، فإن القيمة المتوسطة لشركات الكهرباء في الدول المتقدمة تبلغ حوالي 1.36 ساعة.

- مؤشر متوسط تكرار انقطاع الخدمة للعملاء (CAIFI)

Customer average interruption Frequency index

CAIFI = (إجمالي عدد انقطاعات الخدمة للعملاء) ÷ (إجمالي عدد العملاء الذين تعرضوا لانقطاع الخدمة)

يُعرّف مؤشر CAIFI متوسط عدد الانقطاعات المشروطة بين فئة العملاء الذين تعرضوا لانقطاع واحد على الأقل.

- مؤشر الطاقة المتوقعة غير المُلبّاة أو غير المجهزة (EENS): يقيس الطلب المتوقع على الطاقة الذي لم يتم تلبيته.
- مؤشر متوسط توافر الخدمة (ASAI)

Average service availability index

يمثل مؤشر متوسط توافر الخدمة (ASAI) توافر النظام المرجح حسب احتياجات المستهلكين، ويقدم نفس المعلومات التي يقدمها مؤشر SAIDI. تشير قيم ASAI الأعلى إلى مستويات أعلى من وثوقية النظام. يمكن تعريف هذا المقياس على النحو التالي:

ASAI = توافر الخدمة خلال ساعات المستهلكين / طلب الخدمة خلال ساعات المستهلكين (بنسبة الوحدة .p.u)

أيضاً ، يعرف مؤشر متوسط توافر النظام (ASAI) هو نسبة إجمالي ساعات توفر الخدمة للعملاء إلى إجمالي ساعات توفر الخدمة خلال الفترة التي يُحسب المؤشر لها. ويمكن إثبات ذلك سنويًا.

$$\text{ASAI} = \left[1 - \frac{\text{SAIDI}}{8760\text{ h per year}}\right] \times 100$$

على سبيل المثال، يشير مؤشر ASAI البالغ 99.9543 إلى أن متوسط وقت توفر الخدمة للمستهلك كان 8756 ساعة من إجمالي 8760 ساعة في السنة، أي ما يعادل 4 ساعات سنويًا. يتم الإبلاغ عن هذه المؤشرات بشكل دوري سنويًا، وعادةً ما تُحسب لكل مغذي. وتقدم التقارير الإجمالية إحصاءات قابلة للمقارنة على مستوى المنطقة أو المقاطعة، وعلى مستوى النظام بأكمله. ويمكن حساب هذه المؤشرات بسهولة وصولًا إلى مستوى محول التوزيع.

- **مؤشرات وثوقية إضافية**

• مؤشر انقطاع خدمة المستهلكين

يمكن استنتاج مؤشرات أخرى من المؤشرات الأساسية λ و r و U. يُعد مؤشر انقطاع خدمة العملاء أحد أكثر المؤشرات شيوعًا نظرًا لسهولة قياسه عمليًا. فإذا كان هناك 200 مستهلك في كل نقطة من نقاط التحميل في المثال السابق، فإن مؤشر انقطاع خدمة العملاء (CII) يُحسب كما يلي:

$$CII = \sum (\text{عدد المستهلكين } x\ U)$$

$$= 200x1.7 + 200x2.4 + 200x3.1 + 200x3.8$$

= 2200 ساعات انقطاع الطاقة عن المستهلك في السنة

o •مؤشر انقطاع الطاقة

يُعدّ مؤشر انقطاع الطاقة (EII) أو ميغاواط ساعة/سنة غير مُزوَّدة مؤشرًا بديلًا، لا سيما عند تقييم تكلفة الانقطاع. فإذا كان متوسط الحمل عند كل نقطة تحميل في المثال السابق 500 كيلوواط، فإن مؤشر انقطاع الطاقة هو

$$EII = \sum (MWh\ (or\ kWh)\ x\ U)$$

$$= 500x1.7 + 500x2.4 + 500x3.1 + 500x3.8$$

$$= 5500\ kWh\ lost\ /yr$$

= 5.5 MWh lost /yr

- **مؤشرات إضافية موجهة نحو المستهلكين (IEEE 1366)**

o متوسط مؤشر عدم توافر الخدمة (ASUI) Average Service Unavalability Index

o متوسط مؤشر مدة انقطاع النظام (ASIDI) Average System Inturuption Duration Index

o متوسط مؤشر تكرار انقطاع النظام (ASIFI) Average System Inturuption Frequency Index

o تقديرات تكلفة انقطاع القطاع: دالة أضرار العميل (CDF) Consumer Damage Function

o متوسط إجمالي مدة انقطاع الخدمة للعملاء (CTAIDI)

Consumer Total Average Inturuption Duration Index

- **مؤشرات أخرى، بما في ذلك على سبيل المثال لا الحصر:**

o Consumers Expriencing Multiple Inturuption (CEMI)

o Consumers Expriencing Long Inturuption Duration (CELID)

- مؤشرات الطاقة (التكلفة)

o مساهمات العناصر في مؤشر الطاقة غير المُزوَّدة (EENS) وترتيبها

o مساهمات العناصر في مؤشر تكلفة الطاقة (ECOST) وترتيبها

o الطاقة المتوقعة غير المُزوَّدة - تحليل حساسية مؤشر الطاقة غير المُزوَّدة (EENS)

o تكلفة الانقطاع المتوقعة - تحليل حساسية مؤشر تكلفة الطاقة (ECOST)

o معدل تقييم الطاقة المنقطعة (IEAR)

10-5-4 مؤشرات الحمل والطاقة

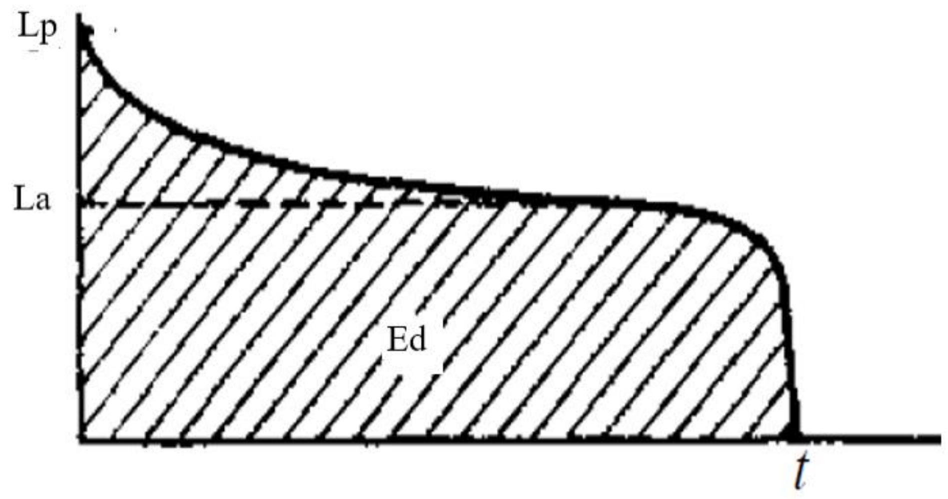
يُعدّ متوسط الحمل عند كل نقطة تحميل على قضيب التوزيع أحد أهم المعايير المطلوبة لتقييم مؤشرات الحمل والطاقة. ويُعطى متوسط الحمل La بالعلاقة التالية:

(a) La = Lp f (10.4)

حيث Ip = ذروة الطلب على الحمل = معامل الحمل

(ب) La = إجمالي الطاقة المطلوبة خلال الفترة الزمنية المحددة ÷ الفترة الزمنية المحد ة = $\frac{E_d}{t}$

حيث يظهر كل من E_d و t على منحنى الحمل-المدة في الشكل 10-6 ، و t عادةً ما تكون سنة تقويمية واحدة.



الشكل10-6: توضيح لـ Lp، La، Ed و t .

(i) مؤشر الطاقة غير المُزوَّدة، ENS

ENS = إجمالي الطاقة غير المُزوَّدة من النظام = Z La(i)Ui (10.5)

حيث La(i) هو متوسط الحمل المتصل بنقطة التحميل i.

(ii) متوسط الطاقة غير الموردة، أو متوسط مؤشر تقليص النظام،

ASCI = إجمالي الطاقة غير الموردة ÷ إجمالي عدد العملاء المخدومين (10.6)

(iii) متوسط مؤشر تقليص العميل، ACCI

A CCl = الطاقة غير الموردة ÷ إجمالي عدد العملاء المتأثرين (10.7)

يختلف هذا المؤشر عن مؤشر AENS بنفس الطريقة التي يختلف بها مؤشر CAIFI عن مؤشر SAIFI. لذا، يُعدّ مؤشرًا مفيدًا لرصد تغيرات متوسط الطاقة غير المُزوَّدة بين سنة تقويمية وأخرى.

تُعدّ المؤشرات الموجهة نحو العميل والحمل، والموصوفة في الفقرتين 10-5-3 و10-5-5، مفيدةً للغاية لتقييم مدى خطورة أعطال النظام في تحليل التنبؤ بوثوقية النظام المستقبلية. ويمكن استخدامها أيضًا كوسيلة لتقييم الأداء السابق للنظام. في الواقع، في الوقت الحالي، يُرجّح أنها تُستخدم على نطاق أوسع في هذا الصدد مقارنةً باستخدامها كمقاييس للأداء المستقبلي. يُعدّ تقييم أداء النظام إجراءً قيّمًا لثلاثة أسباب مهمة:

(أ) يُحدّد التغيرات الزمنية في أداء النظام، وبالتالي يُساعد في تحديد نقاط الضعف والحاجة إلى تعزيزها.

(ب) يُحدّد المؤشرات الحالية التي تُستخدم كدليل للقيم المقبولة في تقييمات الوثوقية المستقبلية.

(ج) يُتيح مقارنة التنبؤات السابقة مع الخبرة التشغيلية الفعلية.

يمكن توضيح تقييم مؤشرات أداء النظام من خلال النظر في جزء من نظام توزيع يحتوي على ستة قضبان توصيل كهربائية. يوضح الجدول 10-4 عدد المشتركين ومتوسط الحمل المتصل بهذه القضبان. وبافتراض حدوث أربعة أعطال في النظام خلال سنة تقويمية محددة، مما يؤدي إلى انقطاعات في التيار الكهربائي كما هو موضح في الجدول10-5.

تتيح المعلومات الواردة في الجدولين 10-4 و10-5 تقييم جميع مؤشرات أداء المشتركين و مؤشرات الحمل كما هو موضح أدناه:

الجدول 10-4 .

نقطة الحمل	عدد المستهلكين N	متوسط الحمل المربوط La (kW)
1	1000	5000
2	800	3600
3	600	2800
4	800	3400
5	500	2400
6	300	1800
المجموع	4000	19000

الجدول 10-5 تأثيرات الانقطاعات في سنة تقويمية معينة.

حالة الإنقطاع	نقطة الحمل المتأثرة	عدد المستهلكين المفصولين (Nc)	الحمل المقلص $Lc\ (kW)$	فترة الإنقطاع $d\ (hrs)$	ساعات المستهلكين المقلصة $Nc\ d$	الطاقة غير المجهزة $Lc\ d\ (kWh)$
1	2	800	3600	3	2400	10800
	3	600	1800	3	1800	8400
2	6	300	1800	2	600	3600
3	3	600	2800	1	600	2800
4	5	500	2400	1.5	750	3600
	6	300	1800	1.5	450	2700
المجموع		3100	15200		6600	31900

N_a = عدد المستهلكين المتأثرين بالإنقطاع $= 800 + 600 + 300 + 500 = 2200$

$$SAIDI = \frac{\Sigma N_C d}{\Sigma N} = \frac{6600}{3100} = 1.65 \text{ hours/customer}$$

$$= 99.0 \text{ minutes/customer}$$

$$CAIDI = \frac{\Sigma N_C d}{\Sigma N_C} = \frac{6600}{3100} = 2.13 \text{ hours/customer interruption}$$

$$= 127.7 \text{ minutes/customer interruption}$$

$$ASAI = \frac{\Sigma N \times 8760 - \Sigma N_C d}{\Sigma N \times 8760} = \frac{4000 \times 8760 - 6600}{4000 \times 8760}$$

$$= 0.999812$$

$$ASUI = 1 - 0.999812 = 0.000188$$

$$ENS = \Sigma\ L_C d = 31900 \text{ kWh}$$

$$AENS = \frac{ENS}{\Sigma N} = \frac{31900}{4000} = 7.98 \text{ kWh/customer}$$

$$ACCI = \frac{ENS}{N_a} = \frac{31900}{2200} = 14.5 \text{ kWh/customer affected}$$

10-5-5 التنبؤ بالنظام

لتوضيح تقييم المؤشرات الموجهة نحو العملاء والحمل أثناء تقييم الأداء المستقبلي، والمعروف بالتنبؤ بالنظام، أعد النظر في النظام الموضح في الشكل 10-1 ومؤشرات الوثوقية الأساسية الموضحة في الجدول10-3. لنفترض أن عدد العملاء ومتوسط طلب الحمل عند كل قضيب توزيع كما هو موضح في الجدول10-6.

الجدول10-6: تفاصيل النظام الموضح في الشكل 10-5 .

نقطة الحمل	عدد المستهلكين	متوسط الطلب على الحمل (kW)
L1	200	1000
L2	150	700
L3	100	400
المجموع	450	2100

يمكن الآن تقييم المؤشرات الموجهة نحو المستهلكين والحمل على النحو التالي:

$$SAIFI = \frac{0.2 \times 200 + 0.3 \times 150 + 0.45 \times 100}{200 + 150 + 100} = 0.289$$ انقطاعات/ خدمة العملاء في السنة

$$SAIDI = \frac{1.2 \times 200 + 1.7 \times 150 + 2.9 \times 100}{450} = 1.74$$ ساعات/انقطاع العميل

$$CAIDI = \frac{1.2 \times 200 + 1.7 \times 150 + 2.9 \times 100}{0.2 \times 200 + 0.3 \times 150 + 0.45 \times 100} = 6.04$$ ساعات/انقطاع العميل

$$ASAI = \frac{450 \times 8760 - 1.2 \times 200 + 1.7 \times 150 + 2.9 \times 100}{450 \times 8760} = 0.999801$$

$$ASUI = 1 - 0.999801 = 0.000199$$

$$ENS = 1000 \times 1.2 + 700 \times 1.7 + 400 \times 2.9 = 3550$$ كيلوواط ساعة/سنة

10-6 تقييم وثوقية المحطات الثانوية المعزولة بالهواء Air-Insulated Substations

يقصد بالمحطات الثانوية المعزولة بالهواء هي المحطات التقليدية التي يكون العزل في معداتها التشغيلية هو الهواء الطبيعي وخاصة عزل قضبان التوزيع .ويشمل ذلك ساحات التبديل بأنواعها Switchyards. وتؤثر عوامل مختلفة على وثوقية المحطة الثانوية أو ساحة التبديل ، أحدها هو ترتيب قضبان التوزيع و معدات التبديل. بالإضافة إلى الوثوقية فان ترتيب قضبان التوزيع Bus bars وأجهزة التبديل (المفاتيح الكهربائية) Switchgears سوف تؤثر تأثيراً قوياً على عملية الصيانة والحماية والتطوير الأولي للمحطات الثانوية والتكلفة. ويوضح الشكل 10-7 معدات محطة ثانوية معزولة بالهواء .

الشكل 10-7معدات محطة

ثانوية معزولة بالهواء.

1-6-10 قضبان التوزيع Bus bars

تعد قضبان التوزيع أو القضبان الحافلة مكونًا مهمًا جدًا في المحطة الثانوية الكهربائية. وهي نوع من الموصلات الحاملة للتيار (قضبان من النحاس ترتبط بها كل المحولات والمغذيات التي تكون بالفولتية نفسها) ومهمتها هي نقل القدرة الكهربائية من خلية إلى أخرى حيث يتم إجراء العديد من التوصيلات عليها. بمعنى آخر، يمكن تعريفها على أنها أحد أنواع التوصيلات الكهربائية التي يحدث فيها ومن خلالها التيار الداخل والتيار الخارج.أنظر الشكل 10 -8.

هناك سبعة أنواع من ترتيبات قضبان التوزيع / تبديل المحطات الثانوية المستخدمة بشكل شائع في المحطات الثانوية المعزولة بالهواء

1. قضيب توزيع مفرد Single bus
2. قضيب توزيع مزدوج مع قواطع مزدوجة Double bus, double breaker

الشكل10- 8 قضبان التوزيع (الباصبار).

3. قضبان توزيع رئيسية وتحويلية (قضبان التفتيش). Main and transfer (inspection) bus

4. قضيب توزيع مزدوج مع قاطع مفرد Double bus, single breaker

5. قضبان التوزيع الحلقية Ring bus

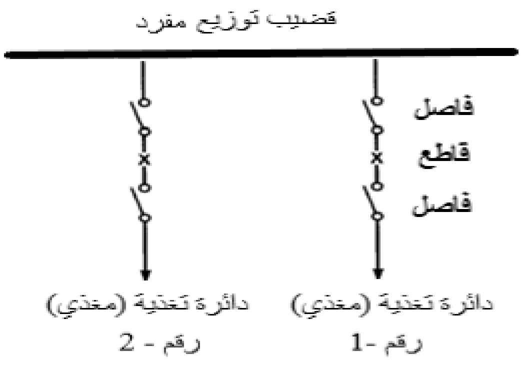
6. نظام الشبكى Mesh system

7. قاطع دائرة ونصف Breaker and a half

2-6-10 قضيب توزيع مفرد Single bus

يتضمن هذا الترتيب استعمال قضيب توزيع رئيسي واحد يتم توصيل جميع الدوائر مباشرة به. ويعد هذا الترتيب سهل التشغيل وقليل الكلفة وتكون فيه إضافة طرق تغذية جديدة بسهولة . إلا أن الوثوقية لهذا النوع من الترتيبات تكون منخفضة جدًا. وعند حمايتها بشكل صحيح بواسطة مرحلات الحماية ، فعندما يحدث فشل واحد في قضيب التوزيع الرئيسي أو أي جزء من الدائرة بين قاطع الدائرة وقضيب التوزيع الرئيسي سوف يتسبب في انقطاع التيار الكهربائي عن النظام بأكمله. إضافة إلى ذلك، تتطلب صيانة الأجهزة الموجودة على هذا النظام إلغاء تشغيل الخط المتصل بالجهاز. كذلك فان إجراء عملية الصيانة على قضيب التوزيع نفسه سوف تتطلب قطع التيار الكهربائي عن النظام ككل، واستخدام مولد طوارئ احتياط لتغذية النظام ، أو التبديل إلى محطة مجاورة إذا كان ذلك متاحا.

ونظرًا لكون ترتيب قضيب التوزيع المفرد منخفض الوثوقية، فلا يوصى باستخدامه في المحطات الثانوية ذات الأحمال الثقيلة أو المحطات الثانوية التي تكون فيها متطلبات توافر الطاقة الكهربائية عالية. ويمكن تحسين موثوقية هذا الترتيب من خلال إضافة قاطع ربط bus tie breaker لقضيب التوزيع لتقليل تأثير فشل القضيب الرئيسي.انظر الشكل 10-9.



الشكل 10-9 نظام قضيب التوزيع المفرد Single bus

كما يوضح الشكل 10-10 ترتيب قضيب توزيع واحد ذي خمسة قواطع دائرة وأربع دوائر تغذية خارجة و قضيب توزيع واحد وعشرة قواطع. مفاتيح التأريض (غير موضحة) لكنها تكون مطلوبة.

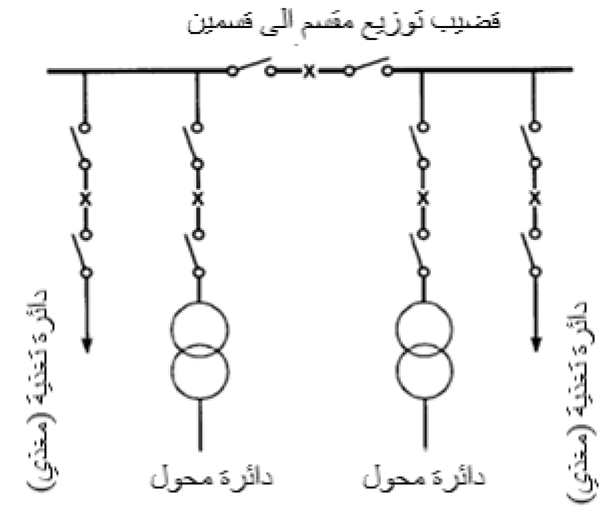
1. كل دائرة محمية بواسطة قاطع دائرة كهربائي خاص بها وبالتالي انقطاع التيار الكهربائي في المحطة لا يؤدي بالضرورة إلى فقدان التجهيز عن المنظومة ككل.

2. حدوث عطل لأحد قواطع الدائرة الخاصة بحماية المغذيات أو وجود خلل في قاطع الدائرة الخاص بحماية المحول إلى يؤدي فقط فقدان المحول أودائرة التغذية. لكن يمكن استعادة إي منهما بعد عزل قاطع الدائرة المتعرض للعطل.

3. يؤدي وجود عطل في أحد قواطع الدائرة الخاصة بحماية وحدة قضيب التوزيع إلى إيقاف تشغيل المحطة الثانوية بالكامل. لكنه يمكن استعادة جميع الدوائر بعد عزل قاطع الدائرة المتعرض للعطل وسيتم "تقسيم" المحطة الثانوية في ظل هذه الظروف.

4. يؤدي عطل قضيب توزيع إلى فقدان محول واحد ومغذي واحد. كما إن إجراء الصيانة على جزء من قضيب التوزيع أو على مفتاح فاصل واحد سيؤدي إلى انقطاع التيار الكهربائي عن الدائرتين مؤقتًا.

5. إجراء عملية صيانة لقاطع دائرة أحد المغذيات أو المحول تنطوي على فقدان تلك الدائرة الكهربائية.



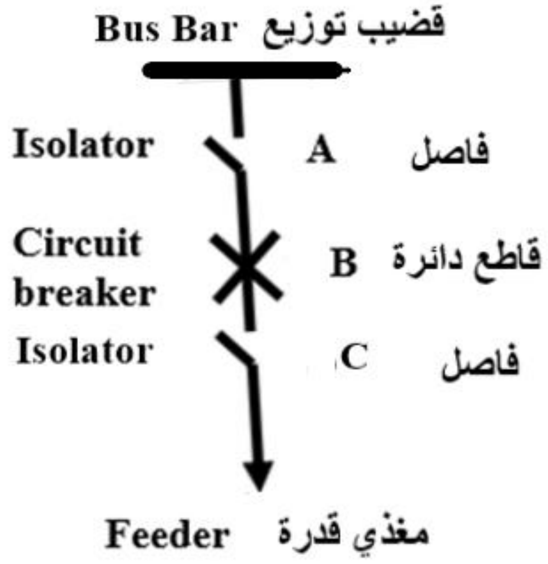
الشكل 10-10 نظام قضيب التوزيع المفرد المقسم قسمين مع خمس قواطع دائرة.

7-10 تقييم وثوقية أنظمة التوزيع المختلفة

1-7-10 مخطط قضيب التوزيع الأحادي الأساسي

يبدأ تطوير الصيغ العامة لأنظمة التوزيع بدراسة أبسط أنواع توصيلات لوحات التوزيع الكهربائية وأرخصها، وهو مخطط قضيب التوزيع الأحادي الموضح في الشكل 10-11 والذي يتكون هذا المخطط من عازلين (A وC) وقاطع دائرة واحد (B). يمكن الحصول على تحليل الوثوقية الكامل لهذا المخطط، مع استبعاد وقت الإصلاح وتعديل التوافرية، (الوثوقية)، والتي تُعتبر احتمال نجاح (P) النظام أو المكون، باستخدام الطرق البسيطة للاحتمالات ونظرية المجموعات. وبالتالي، يكون النظام الناتج في الشكل 10-8 متاحًا إذا كانت العناصر الثلاثة تعمل في وقت واحد،

$$P_I = P(A \cap B \cap C) = Pa\ Pb\ Pc \qquad (10.8)$$



الشكل 10-11 قضيب التوزيع المفرد (الأحادي) الأساسي .

حيث:

PI = احتمال نجاح النظام.

Pa = احتمال نجاح اشتغال الفاصل A.

Pb = احتمال نجاح اشتغال قاطع الدائرة B.

Pc=احتمال نجاح اشتغال الفاصل C.

من أجل اعتماد نموذج وثوقية مناسب لهذا النظام، من المعروف جيدًا أنه يمكن تصنيف نموذج الوثوقية إلى مجموعتين: الوثوقية Reliability والتوافرية Availability . من بين الاثنين، يميل نموذج التوافرية إلى أن يكون أكثر تعقيدًا. ومع ذلك، يمكن تبسيط نموذج النظام بشكل كبير إلى مقياس يمكن التحكم فيه من خلال التركيز على الحد الأعلى أو الأدنى لوثوقية النظام أو توافره، من خلال إهمال الحدث ذي الاحتمالية الضئيلة جدًا. عادةً ما تصل النتائج إلى نموذج نظام بسيط للغاية يمثل سلوك النظام تقريبًا وهذا ما تم القيام به في هذه المضمار من خلال حذف وقت إصلاح Repairing time مكونات النظام، نظرًا لقيمته الصغيرة. ومع افتراض أن النظام غير قابل للإصلاح، يمكن دائمًا اشتقاق وثوقية النظام من خلال التقنية المنطقية. وبالتالي، يمكن التعبير عن وثوقية النظام كدالة لوثوقية المكونات، أو

$$R_s = f(R_1, R_2, \ldots\ldots\ldots\ldots, R_n) \qquad (10.9)$$

حيث Ri هي وثوقية المكون i في النظام. وبالتالي، يمكن اعتبار التوافر المستقر أو المتوسط هنا ببساطة كوثوقية، والعكس صحيح. وبالتالي، ستكون وثوقية نظام قضيب التوزيع المفرد الموضح في الشكل5-1 كالآتي:.

$$R_I = P_I = R_a R_b R_c \qquad (10.10)$$

يمكن إيجاد احتمال فشل نقطة الحمل (نعتبره هنا بمثابة فشل نقطة التغذية) على النحو التالي:

$$Q = 1-P \qquad (10.11)$$

ومن ثم، يمكن إيجاد احتمال فشل النظام (عدم الوثوقية) عند نقطة التحميل باستخدام المعادلة (10.11). وبالتالي، إذا افترضنا عدم وجود قيود على مكونات التوزيع وأن الاتصال بقضيب التوزيع موثوق بنسبة 100٪ هو المعيار الوحيد،

$$Q_s = 1-R_s \qquad (10.12)$$

وبالتالي، يتم تحديد عدم وثوقية unreliability مؤشر الجودة لنظام قضيب التوزيع المفرد بواسطة

$$Q_I = 1- R_I = 1 - R_a R_b R_c$$

$$= 1-(1-Q_a)(1-Q_b)(1-Q_c)$$

$$= Q_a + Q_b + Q_c - Q_a Q_b - Q_a Q_c - Q_b Q_c - Q_a Q_b Q_c \qquad (10.13)$$

وإذا كان الفاصلان A و C متماثلين، فإن Ra = Rc و Qa = Qc، وعليه

$$R_I=R_a^2\, R_b$$

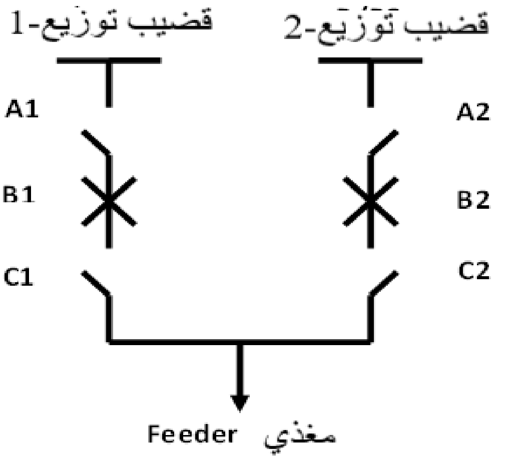
$$Q_I = 2\, Q_a + Q_b - Q_a^2 - 2\, Q_a\, Q_b + Q_a^2\, Q_b \qquad (10.14)$$

ويمكن تحديد وقت الانقطاع السنوي المتوقع بالساعات لهذا النظام بالصيغة التالية:

$$T_{fI} = 8760\, Q_I \qquad (10.15)$$

10-7-2 أنظمة القضبان المزدوجة والقواطع المزدوجة

لا يسمح تصميم القضبان المفردة بصيانة القواطع أو العوازل دون انقطاع التيار الكهربائي. وللتغلب على هذه الصعوبة، تُستخدم أنظمة القضبان المزدوجة والقواطع المزدوجة. إلا أن هذا النظام مكلف، ويُستخدم بشكل أساسي في محطات التوليد الكبيرة والأحمال الحرجة حيث يُعدّ أمن الإمداد أمرًا بالغ الأهمية. يوضح الشكل 10- 12 تصميم هذا النظام (النظام الثاني)، حيث يكون النظام متاحًا إذا كان أحد المسارات المتوازية على الأقل متاحًا: A_1 أو B_1 أو C_1، أو A_2 أو B_2 أو C_2.



الشكل 10-12 نظام القضيب المزدوج والقاطع المزدوج.

ويمكن تحقيق ذلك كما يلي:

$$P_{II} = P[\,(A_1 \cap B_1 \cap C_1) \cup (A_2 \cap B_2 \cap C_2)]$$

$$= P\,(A_1 \cap B_1 \cap C_1) + P(A_2 \cap B_2 \cap C_2) - P\,(A_1 \cap B_1 \cap C_1)\, P\,(A_2 \cap B_2 \cap C_2)$$

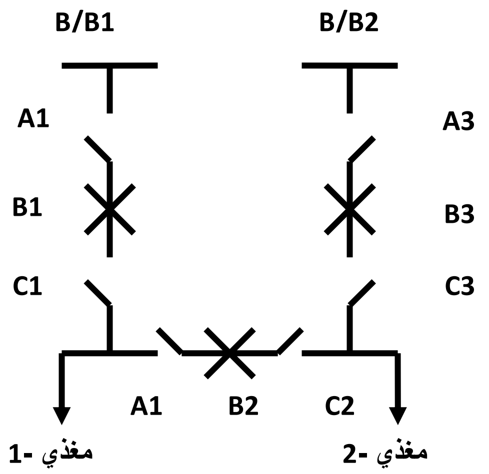
$$= P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1 + P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2 - P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1\, P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2$$

$$P_{II} = 1 + Pa1\, Pb_1\, Pc_1\, P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2 - P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1 - P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2$$

ويُحدد عدم توافر هذا النظام بالصيغة : $Q_{II} = 1 - P_{II}$

3-7-10 نظام قضيب التوزيع المزدوج مع قاطع الدائرة ونصف الدائرة

يمثل هذا النظام حلاً وسطًا بين النظامين السابقين. وقد أثبت أنه الترتيب الأكثر وثوقية واقتصادية لتغذية خطي تغذية في نظام حلقي. يوضح الشكل 10-13 تصميم هذا النظام . ويمكن أن تتخذ وثوقية خطوط التغذية الأشكال التالية:



الشكل 10-13 نظام قضيب التوزيع المزدوج مع قاطع الدائرة ونصف الدائرة.

$$P_{III} = P\,[(A1 \cap B_1 \cap C_1)\ U\ (A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap A_3 \cap B_3 \cap C_3)]$$

$$= P\,(A1 \cap B_1 \cap C_1) + P\,(A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap A_3 \cap B_3 \cap C_3)$$

$$-P\,(A1 \cap B_1 \cap C_1)\ P\,(A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap A_3 \cap B_3 \cap C_3)$$

$$= P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1 + P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2 + P_{a3}\, Pb_3\, Pc_3 - P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1\, P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2\, P_{a3}\, Pb_3\, Pc_3$$

يتم تحديد عدم توافر النظام من خلال،

$$Q_{III} = 1 - P_{III} = 1 - P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1 - P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2 - P_{a3}\, Pb_3\, Pc_3 + P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1\, P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2\, P_{a3}\, Pb_3\, Pc_3$$

واذا كانت

$$P_{a1} = P_{a2} = P_{a3} = Pc_1 = Pc_2 = Pc_3 = P_a$$

واذا كانت

$$Pb_1 = Pb_2 = Pb_3 = Pb$$

لذلك

$$P_{III} = P_a^2\, Pb + P_a^4\, Pb^2 - P_a^6\, Pb^3 \qquad (10.16)$$

$$= P_I + P_I^2 + P_I^3$$

يُعطى عدم توافر النظام بواسطة

$$Q_{III}= 1- P_{III} = (1- P_I)(1- P_I^2) \qquad (10.17)$$

يتم تحديد مدة الانقطاع السنوية بواسطة

$$T_{fIII} = 8760\,(1- P_{III})$$

ويوضح الجدول 10-7 التالي وثوقية ووقت الفشل / السنوي لقيم مختلفة لوثوقية العناصر.

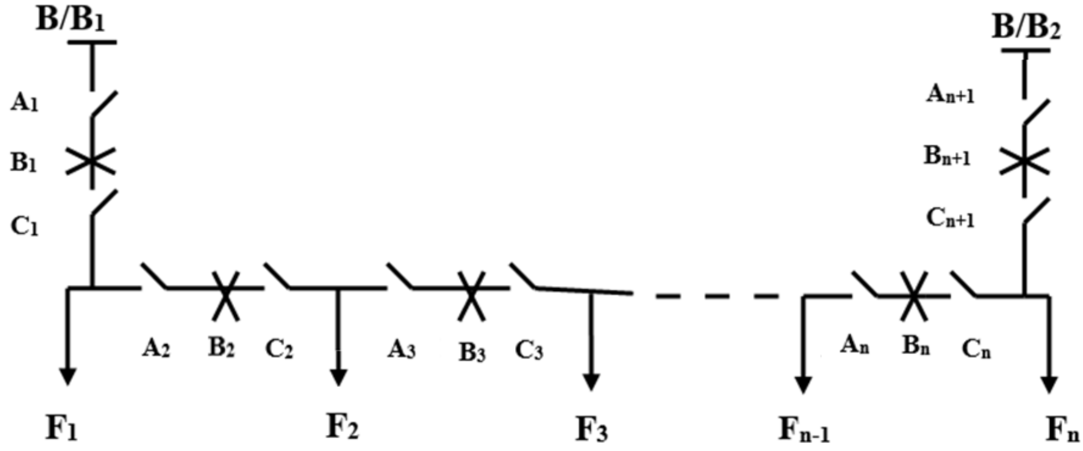
الجدول 10-7: معلمات النظام لقاطع الدائرة الكهربائية ونظام نصف قاطع الدائرة

$P_a = P_b = P_c$	P_{III}	T_{fIII} (hours)
0.9000	0.873020	1112.342
0.9900	0.998261	15.22759
0.9990	0.999982	0. 158729
0.9999	0.999999	0.004177

10-7-4 الحل العام لنظام الربط الحلقي الذي يحوي عدد n من المغذيات

يبدو أن نظام الربط الحلقي يمتلك جميع الميزات المطلوبة تقريبًا. فبما أن الحلقة مغلقة، فإن كل مغذٍّ مزود بمصدرين لتزويد الطاقة، ويمكن إيقاف أي قاطع دائرة عن العمل للإصلاح أو الصيانة دون التأثير على التغذية ككل . مع ذلك، في أنظمة التوزيع التي تحتوي على أكثر من مصدر إمداد، كما هو الحال في نظام الربط الحلقي، لا تُدرج الصيانة المجدولة عادةً في تقييم وثوقية منطقة الحمل، نظرًا لإمكانية إخطار العملاء مسبقًا أو اتخاذ ترتيبات بديلة، وبالتالي يتم انقطاع نقطة التحميل عمدًا، وهو أمر لا يمكن اعتباره حدثًا عرضيًا .بالإضافة إلى ذلك، عادةً ما تُجري العديد من شركات الكهرباء صيانةً غير منسقة لكل مُكوّن في نظام التوزيع لمدة لا تتجاوز 8 ساعات، وفي كثير من الحالات، تُجرى صيانة مُكوّنات فرع مُعيّن في آنٍ واحد. هذا يعني انخفاض إجمالي وقت التعرّض السنوي الذي قد يتعطل خلاله مُكوّن في فرع آخر، وبالتالي انخفاض احتمالية تعطل النظام. لذا، من الواضح أن إدراج الصيانة في بعض أنظمة التوزيع، مثل النظام الحلقي ، ليس بتلك الأهمية.

تأمل الآن في المخطط الموضح في الشكل 10-14 ، من خلال إهمال وقت الإصلاح والصيانة، يمكن ببساطة إيجاد احتمال نجاح وحدة التغذية رقم F1 على النحو التالي:



الشكل 10-14 منظومة حلقة ذات عدد n من المغذيات.

باستخدام طريقة الأحتالية ونظرية المجموعات نجد قيمة احتمال نجاح المغذي رقم F1 والذي يرمز له بالوثوقية P_{F1} وكالاتي :

$$P_{F1} = [(A_1 \cap B_1 \cap C_1) U (A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap A_3 \cap B_3 \cap C_3 \cap \ldots\ldots\ldots \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1})]$$

$$= P(A_1 \cap B_1 \cap C_1) + P(A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap A_3 \cap B_3 \cap C_3 \cap \ldots\ldots\ldots \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1})$$

$$- P\ (A1 \cap B_1 \cap C_1 \cap A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap A_3 \cap B_3 \cap C_3 \cap \ldots\ldots\ldots \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap$$

$$= P_{a1}\ P_{b1}\ P_{c1} + P_{a2}\ P_{b2}\ P_{c2} + P_{a3}\ P_{b3}\ P_{c3} + \ldots\ldots\ldots + P_{a\,(n+1)}\ P_{b(n+1)}\ P_{c(n+1)}$$

$$- P_{a1}\ P_{b1}\ P_{c1}\ P_{a2}\ P_{b2}\ P_{c2}\ P_{a3}\ P_{b3}\ P_{c3} \ldots\ldots\ldots\ldots\ P_{a(n+1)}\ P_{b(n+1)}\ P_{c(n+1)}$$

الآن إذا كانت :

$$P_{a1} = P_{a2} = P_{a3} = \ldots\ldots. = P_{a\,(n+1)} = P_a,\ P_{b1} = P_{b1} = P_{b1} = \ldots\ldots\ P_{b(n+1)} = P_b$$

وكذلك

$$= Pc\ P_{c1} = P_{c2} = P_{c3} = \ldots\ldots + P_{\ (n+1)}$$

مع الأخذ في الاعتبار أن $P\ I = Pa^2\ Pb$، لذلك،

$$P_{F1} = P_I + P_I^n - P_I^{(n+1)}$$

وبالمثل فأن احتمال نجاح المغذي F2 يعطى بالعلاقة:

$$P_{F2} = P\,[(A1 \cap B_1 \cap C_1) \cap (A_2 \cap B_2 \cap C_2)\ U\ (A_3 \cap B_3 \cap C_3 \cap ....A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1})]$$

$$= P\,(A1 \cap B_1 \cap C_1 \cap A_2 \cap B_2 \cap C_2) + P(A_3 \cap B_3 \cap C_3 \cap .... \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1})$$

$$- P\,(A1 \cap B_1 \cap C_1 \cap A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap A_3 \cap B_3 \cap C_3 \cap .... \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1})$$

$$= P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1\, P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2 + P_{a3}\, Pb_3\, Pc_3 ....\ P_{a(n+1)}\, P_{b(n+1)}\, Pc_{(n+1)}$$

$$- P_{a1}\, Pb_1\, Pc_1\, P_{a2}\, Pb_2\, Pc_2\, P_{a3}\, Pb_3\, Pc_3 ....\ P_{a(n+1)}\, P_{b(n+1)}\, Pc_{(n+1)}$$

$$P_{F2} = P_I^2 + P_I^{(n-1)} - P_I^{(n+1)}$$

$$Q_{F2} = 1 - P_{F2}$$

الآن، بالنسبة لأي مغذي k في نظام الربط الحلقي، يمكن إيجاد احتمال النجاح (الوثوقية)على النحو التالي:

$$P_{Fk} = P\,[(A_1 \cap B_1 \cap C_1 \cap A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap .... \cap A_k \cap B_k \cap C_k)\ U(A_{k+1} \cap B_{k+1} \cap C_{k+1} \cap .... \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1})]$$

$$= P\,(A_1 \cap B_1 \cap C_1 \cap A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap ....A_k \cap B_k \cap C_k) + P\,(A_{k+1} \cap B_{k+1} \cap C_{k+1} \cap .... \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1}) .....$$

$$- P\,(A_1 \cap B_1 \cap C_1 \cap A_2 \cap B_2 \cap C_2 \cap ......A_k \cap B_k \cap C_k \cap .... \cap A_{n+1} \cap B_{n+1} \cap C_{n+1})$$

$$= P_{a1}\, P_{b1}\, P_{c1}\, P_{a2}\, P_{b2}\, P_{c2} ...\ P_{ak}\, P_{bk}\, P_{ck} + P_{ak+1}\, P_{bk+1}\, P_{ck+1} ....\ P_{a(n+1)}\, P_{b(n+1)}\, P_{c(n+1)} - P_{a1}\, P_{b1}\, P_{c1}\, P_{a2}\, P_{b2}\, P_{c2} ...\ P_{ak}\, P_{bk}\, P_{ck} ....\ P_{a(n+1)}\, P_{b(n+1)}\, P_{c(n+1)}\ .$$

باستخدام الافتراضات الواردة في المعادلة (10.10) نفسها نحصل على،

$$P_{Fk} = P_I^k + P_I^{(n+1-k)} - P_I^{(n+1)} \qquad (10.18)$$

من حيث الوثوقية، بشكل عام، يمكن الحصول على وثوقية المغذي رقم j في نظام الربط الحلقي الذي يحتوي على عدد n من المغذيات بالصيغة العامة التالية:

$$R_j = R_I^{\,j} + R_I^{\,(n+1-j)} - R_I^{\,(n+1)} \qquad (10.19)$$

حيث R_j هي وثوقية المغذي رقم j .

تجدر الإشارة إلى أن مؤشرات الوثوقية تُقدَّر عادةً بناءً على نقاط الحمل (قضبان التوزيع)، ولكن في حالتنا هذه ، تُؤخذ وثوقية المُغذِّيات الخارجة فقط في الاعتبار. وبالتالي، فإن مفهومي معدل الأعطال ووقت الإصلاح غير قابلين للتطبيق، كما أن عدم الوثوقية ووقت الانقطاع بالساعات سنويًا، كمؤشرات وثوقية، قابلان للتطبيق بشكل معقول. وبالتالي، يُعطى عدم وثوقية المُغذِّي j بالمعادلة التالية:

$$Q_j = 1- R_j = 1- R_I^{\,j} - R_I^{\,(n+1-j)} + R_I^{\,(n+1)}$$
$$= (1- R_I^{\,j})\,(1- R_I^{\,(n+1-j)}) \qquad (10.20)$$

ووقت الانقطاع السنوي المتوقع بالساعات للمغذي j هو:

$$T_{fj} = 8760\,Q_j = 8760\,(1- R_I^{\,j})\,(1- R_I^{\,(n+1-j)}) \qquad (10.20)$$

تمت برمجة المعادلات (10.18) - (10.20) ومعالجتها باستخدام برنامج ماتلاب لدراسة خصائص وثوقية كل مُغذٍّ في نظام الربط الحلقي عند تغيير عدد المُغذِّيات. فكانت النتائج مُبينة في الجدولين 10-8 و10-9.

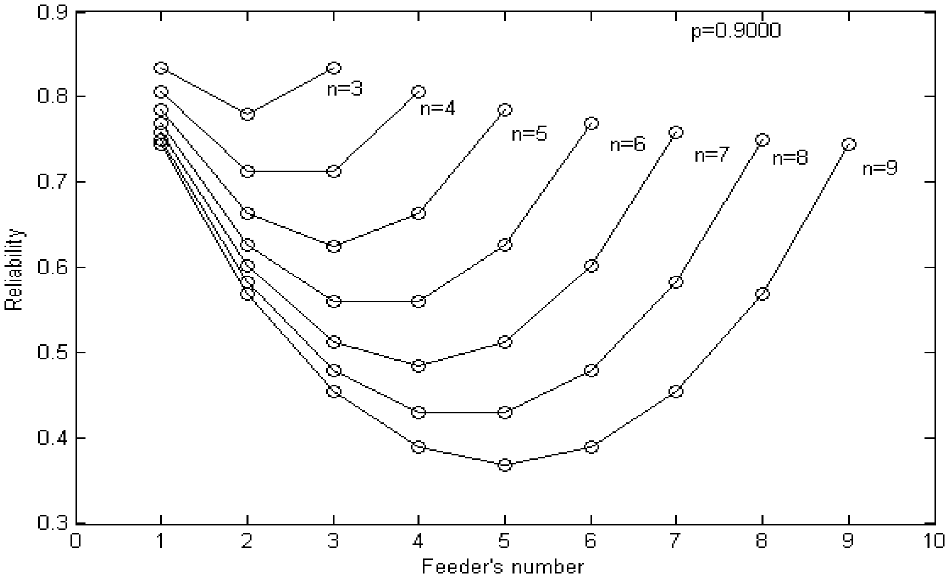
الجدول 10-8 تغير وثوقية المغذيات في لنظام الحلقي - التغذية لثلاثة مغذيات مع وثوقية العناصر الفردية.

Element	Feeder No.1		Feeder No.2		Feeder No.3	
Reliability	R_{F1}	T_{F1}	R_{F2}	T_{F2}	R_{F3}	T_{F3}
0.9000	0.83399	1454.241	0.78045	1923.23	0.83390	1454.241
0.9900	0.997431	22.503	0.99657	30.000	0.997431	22.503
0.9990	0.999973	0.237050	0.99996	0.314326	0.999973	0.237070
0.9999	0.999999	0.002088	0.99999	0.004177	0.9999999	0.002088

الجدول 10-9: تباين زمن انقطاع التغذية لنظام حلقي ذي 7 مغذيات، مع وثوقية مغذيات = .0.9900

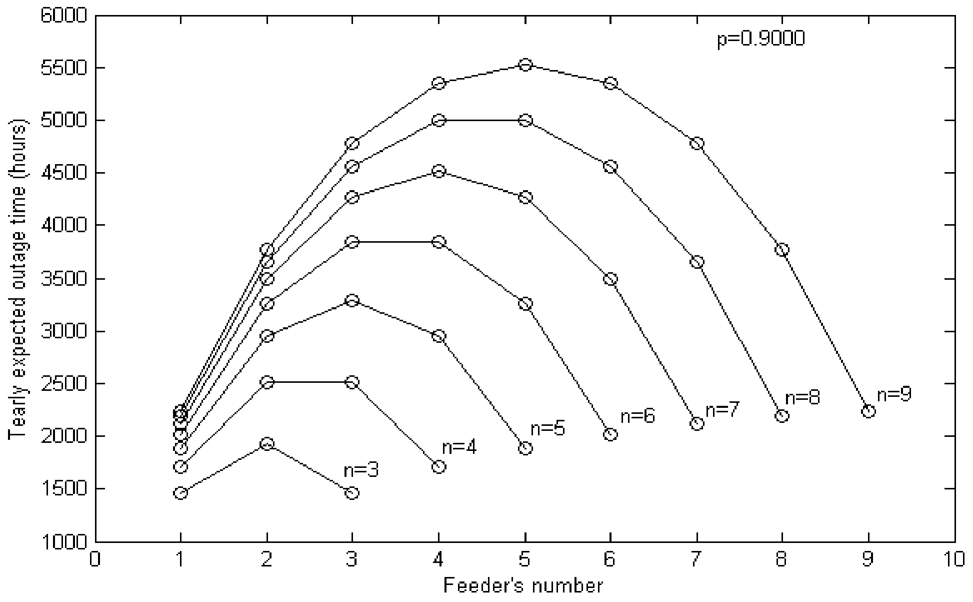
Outage Time in Hours / year $T_F = 8760(1-R_F)$							
n	Feeder-1	Feeder-2	Feeder-3	Feeder-4	Feeder-5	Feeder-6	Feeder-7
1	7.72866	……….	………	………	………	……….	………
2	15.227	15.227	………	……….	………	……..	………
3	22.503	30.000	22.503	………	………	………	…….
4	29.562	44.336	44.336	29.562	………	……….	………
5	36.413	58.245	65.521	58.245	36.413	………..	………
6	43.057	71.74	86.0773	86.0773	71.74	43.057	……..
7	49.507	84.837	106.024	113.081	106.024	84.837	49.507

يوضح الشكل 10-15 (نظامٌ يحتوي على 9 مغذيات) تأثيرَ تباين عدد المغذيات في النظام على وثوقية كلٍّ منها. يُلاحظ انخفاض وثوقية كلِّ مُغذٍّ بزيادة عدد المغذيات الخارجة.



الشكل 10-15 تغير وثوقية وحدة التغذية الفردية مع عدد وحدات التغذية في نظام القضيب الحلقي.

كما يتضح أن أكثر المغذيات وثوقية هي تلك القريبة من نقطتي التغذية ، وهما المغذيان 1 و9 في هذه الحالة. يوضح الشكل 10-16 تباين زمن انقطاع التغذية المتوقع سنويًا لقيم مختلفة لـ n.

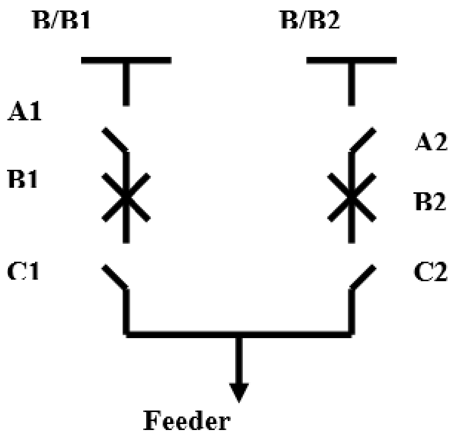


الشكل10-16 : التغير في وقت انقطاع التغذية المتوقع سنويًا لقيم مختلفة من n.

10-7-5 التطبيقات العملية لمعادلة النظام الحلقي العامة

الآن ننظر كيف يمكن تطبيق المعادلة العامة لوثوقية النظام الحلقي الواردة في المعادلات (10.18-10.20) على مختلف أنظمة إمداد الطاقة العملية، وذلك لإيجاد وثوقية، وعدم وثوقية، وزمن انقطاع التغذية لكل وحدة تغذية. يتم تطبيق هذه الصيغ على هذه المخططات باستبدال (n) في المعادلة (10.18) برقمها الفعلي، الذي يمثل عدد وحدات التغذية التي تُغذّي الأحمال في النظام؛ ويمكن القيام بذلك على النحو التالي:

(1) بالنسبة لنظام قاطع الدائرة المزدوج لقضيب التوزيع المزدوج الموضح في الشكل 10-12، يمكن تطبيق صيغة معادلة وثوقية نظام الحلقة العامة مباشرةً عن طريق ضبط $n = 1$ (نظرًا لأن عدد المغذيات = 1) و$j = 1$. وبالتالي، فإن وثوقية هذا النظام ، والتي يمكن تحديدها بواسطة R_{II}، هي،



الشكل 10-12 نظام ذو قضيب توزيع مزدوج وقاطع دائرة مزدوج.

$$R_{II} = 2 R_I - R_I^2$$

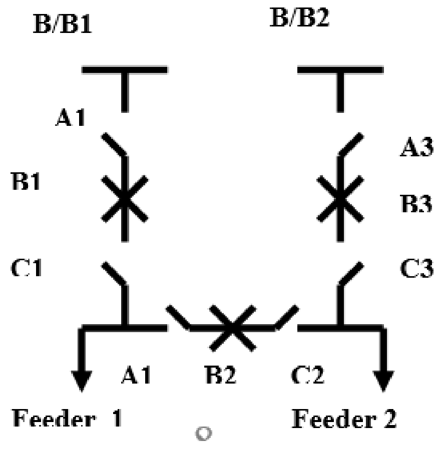
عدم وثوقية النظام يعطى كالآتي :

$$Q_{II} = 1 - R_{II} = 1 - 2 R_I + R_I^2$$

ويتم تحديد وقت الانقطاع السنوي المتوقع بالساعات بواسطة

$$T_{fII} = 8760\, Q_{II} = 8760\, (1 - R_I)^2$$

(2) بالنسبة لمخطط قضيب التوزيع المزدوج مع القاطع ونصف الموضح في الشكل 10-13 ، يمكن تطبيق معادلة النظام الحلقي العامة عن طريق جعل $n = 2$ (نظرًا لأن عدد المغذيات = 2) و $j =$ 1، 2. وبالتالي، فإن وثوقية المغذي 1 و2 في هذا المخطط هي:



الشكل 10-13 نظام قضيب توزيع مزدوج مع قاطع ونصف.

$$R_1 = R_2 = R_I + R_I^2 - R_I^3$$

وبالتالي فإن وثوقية هذا النظام الذي يمكن الإشارة إليه بواسطة R_{III} هي،

$$R_{III} = R_I + R_I^2 - R_I^3$$

عدم وثوقية النظام يعطى بالآتي:

$$Q_{III} = 1 - R_{III} = 1 - R_I - R_I^2 + R_I^3$$

ويتم تحديد وقت الانقطاع السنوي المتوقع بالساعات بواسطة:

$$T_{fIII} = 8760\ Q_{III} = 8760\ (1 - R_I - R_I^2 + R_I^3)$$

يوضح الجدول 10-10 الوثوقية ووقت الانقطاع السنوي المتوقع بالساعات لمخطط قضيب التوصيل المزدوج مع قاطع ونصف لقيم مختلفة من وثوقية العناصر.

الجدول 10-10معلمات نظام القاطع والنصف.

Element Reliability وثوقية العناصر	Feeder 1 and 2 Reliability وثوقية المغذي 1 و المغذي 2	Yearly expected outage time in hours ساعات الإنقطاع السنوية
$R_a = R_b = R_c$	R_{III}	T_{fIII}
0.9000	0.873020	1112.342
0.9900	0.998261	15.22759
0.9990	0.999982	0. 158729
0.9999	0.999999	

6-7-10 نظام توزيع القضبان الثلاثية (الأنظمة الشبكية)

لا تُعدّ مخططات قضبان التوزيع الحلقية التي دُرست في الفقرة السابقة التطبيق الوحيد لإيجاد الترتيبات. فمن الشائع استخدام العديد من أنظمة مصادر التغذية في الشبكات الثانوية. ويتم ربط الدوائر ببعضها البعض عندما تكون هذه الأنظمة قريبة من بعضها البعض، مما يتيح توفر ثلاثة مصادر تغذية أو أكثر.

الآن، بإضافة مصدر تجهيز طاقة ثالث بشكل دائم في أي نقطة مختارة من نظام الحلقة، نحصل على نظام شبكة بسيط (نظام قضبان توزيع ثلاثي)، مما يُمكّن من خدمة المستهلكين من ثلاث نقاط. مع هذا المصدر الإضافي، ستتحسن وثوقية (توافرية) المغذيات الصادرة في نظام الحلقة بشكل كبير.

للحصول على صيغة رياضية عامة لوثوقية المغذيات الصادرة في نظام قضبان التوزيع الثلاثة، لننظر إلى شبكة التوزيع ذات المغذيات رقم n بثلاثة قضبان ناقلة، الموضحة في الشكل10-18.

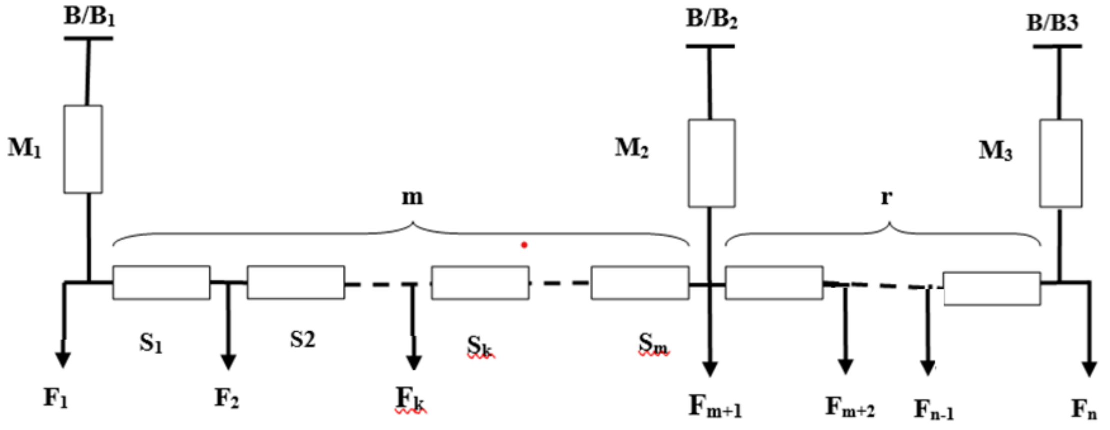
ليكن:

النظام I، الذي يتكون من قاطع دائرة واحد وعازلَين، مُمَثَّل بمستطيل ▭.

يمثل كلٌ من M1 وM2 وM3 و(n,..............,i=1,2,3) Si المكونات المتسلسلة كما هو موضح في الشكل 10-17.

m = عدد المغذيات بين قضبان التوصيل I وII حيث يُركَّب قضيب التوصيل الثاني.

r = عدد المكونات المتسلسلة بين قضبان التوصيل II وIII.



الشكل 10- 17 نظام التوزيع الشبكي (قضبان التوزيع الثلاثة) .

n = إجمالي عدد المغذيات حيث يُركَّب قضيب التوصيل الثالث، بحيث يكون $n = r + m + 1$.

الآن، لأي مُغذّي k في النظام، يُغذّى المُغذّي من المسارات التالية:

المسار (1) = X عبر $(M1 \cap S1 \cap S2 \cap S3 \cap \ldots\ldots \cap Sk-1)$

المسار (2) = Y عبر $(M2 \cap Sk \cap Sk+1 \cap \ldots\ldots \cap Sm-1)$

المسار (3) = Z عبر $(M3 \cap Sn-1 \cap Sn-2 \cap \ldots\ldots \cap Sk)$

ويكون المغذي Fk متاحًا إذا كان مسار واحد أو أكثر من المسارات المذكورة أعلاه متاحًا، ويُعطى ذلك بالعلاقة (XUYUZ). احتمالية هذه الحالة هي:

$$P = P(X) + P(Y) + P(Z) - P(X \cap Y) - P(X \cap Z) - P(Y \cap Z) + P(X \cap Y \cap Z)$$

لذالك يكون

$$P_{Fk} = P(M_1 \cap S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \ldots \cap S_{k-1}) + P(M_2 \cap S_k \cap S_{k+1} \cap \ldots \cap S_{m-1}) + P(M_3 \cap S_{n-1} \cap S_{n-2} \cap \ldots \cap S_k) - P(M_1 \cap S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \ldots \cap S_{k-1} \cap M_2 \cap S_k \cap S_{k+1} \cap \ldots \cap S_{m-1}) - P(M_1 \cap S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \ldots \cap S_{k-1} \cap C \cap S_{n-1} \cap S_{n-2} \cap \ldots \ldots \cap S_k) - P(M_2 \cap S_k \cap S_{k+1} \cap \ldots \cap S_{m-1} \cap M_3 \cap S_{n-1} \cap S_{n-2} \cap \ldots \cap S_k) + P(M_1 \cap S_1 \cap S_2 \cap S_3 \cap \ldots \cap S_{k-1} \cap M_2 \cap S_k \cap S_{k+1} \cap \ldots \cap S_{m-1} \cap C \cap S_{n-1} \cap S_{n-2} \cap \ldots \cap S_k)$$

عند التوسع والمزيد من التبسيط، يمكن إثبات أنه في حالة عملية حيث

$$P(M1) = P(M2) = P(M3) = P(Si) = PI$$

فإن احتمال نجاحات المغذي k هو،

للمغذي $k \le m$

$$P_{Fk} = P_I^{k} + P_I^{m-k+1} + P_I^{n-k+1} - P_I^{m+1} - P_I^{n+1} - P_I^{n-k+2} + P_I^{n+2}$$

للمغذي $k > m$

$$P_{Fk} = P_I^{k} + P_I^{k-m+1} + P_I^{n-k+1} - P_I^{k+1} - P_I^{n+1} - P_I^{n-m+2} + P_I^{n+2}$$

بشكل عام، يمكن الحصول على وثوقية المغذي j في نظام ثلاثي الحافلات بمغذي n، حيث يتم تثبيت قضيب الحافلة الثاني على المغذي m من الصيغ العامة التالية:

للمغذي $j \le m$

$$R_j = P_I^{j} + R_I^{m-j+1} + R_I^{n-j+1} - R_I^{m+1} - R_I^{n+1} - R_I^{n-j+2} + R_I^{n+2}$$

للمغذي $j > m$

$$R_j = P_I^{j} + R_I^{j-m+1} + R_I^{n-j+1} - R_I^{j+1} - R_I^{n+1} - R_I^{n-m+2} + R_I^{n+2} \quad (10.16)$$

يُعطى عدم موثوقية وحدة التغذية j بالمعادلة التالية:

$$Qj = 1 - Rj \quad (10.21)$$

ووقت الانقطاع السنوي المتوقع (بالساعات) لوحدة التغذية j هو:

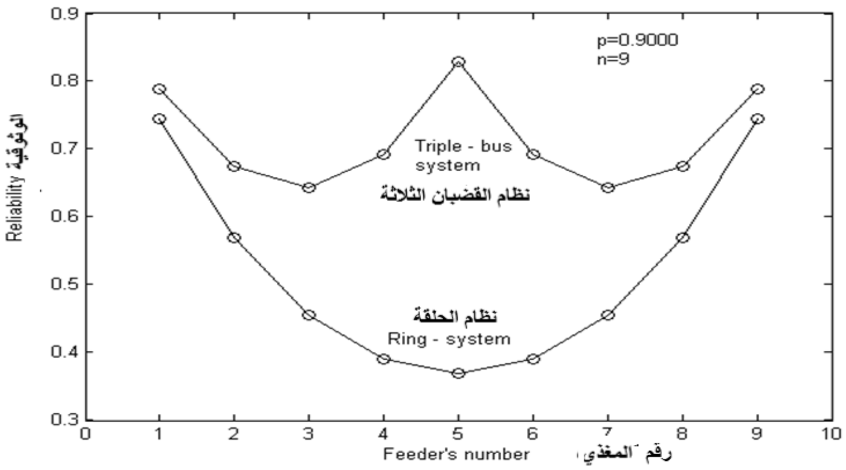
$$Tfj = 8760\ Qj = 8760\ (1- Rj) \quad (10.22)$$

تمت برمجة المعادلات (10.17) - (10.22) على برنامج الماتلاب من أجل دراسة خصائص الوثوقية لكل وحدة تغذية في نظام قضبان التوزيع الثلاثية للمغذيات الثلاثة 1 و 2 و 3 لمقارنة النتائج مع نتائج النظام الحلقي المغذيات الثلاثة الواردة في الجدول10-9 . وكانت النتائج كما مبينة في الجدول 10-5. ومن الواضح من الجدول10-5 أن وثوقية وحدات التغذية الفردية قد تحسنت إلى حد كبير، كما انخفضت أوقات الانقطاع السنوية المتوقعة بشكل كبير مقارنة بقيم النظام الحلقي المغذيات الثلاثة الواردة في الجدولين 10- 8 و10-9 على التوالي.

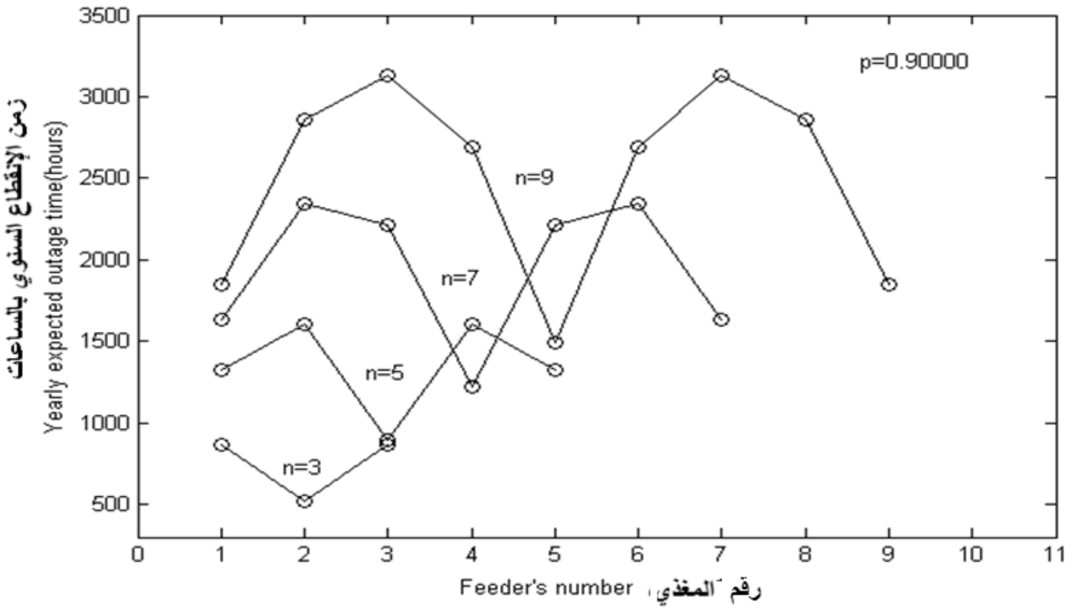
الجدول 10-11 تباين توفر وحدة التغذية الفردية للنظام الشبكي بثلاث وحدات تغذية مع وثوقية العناصر

Element Reliability	Feeder No.1		Feeder No.2		Feeder No.3	
	R_{F1}	T_{F1}	R_{F2}	T_{F2}	R_{F3}	T_{F3}
0.9000	0.98829	102.57	0.99639	31.62	0.98829	102.57
0.9900	0.999898	0.89325	0.999996	0.03469	0.999898	0.89325
0.9990	0.999998	0.00877	0.999999	0.000035	0.999998	0.00877
0.9999	1-000000	0.00000	1.000000	0.000000	1.000000	0.00000

كما يبين الشكل10-18 بوضوح تحسن وثوقية وحدة التغذية في نظام قضيب التوزيع الثلاثي مقارنةً بالنظام الحلقي لأنظمة الـ 9 مغذيات. ويتضح جليًا أن وثوقية جميع وحدات التغذية المرقمة (1، 2، 3، ......، 9) تتحسن بشكل كبير بإضافة قضيب التوزيع الثالث. كما ويعطي الشكل 10-19 أوقات الانقطاع السنوية المتوقعة لأنظمة القضبان الثلاثية ذات أعداد مختلفة من وحدات التغذية الصادرة.



الشكل 10-18 مقارنة بين وثوقية المغذيات الخارجة لنظامي الحلقة وقضبان التوزيع الثلاثية ا



الشكل 10-19 أوقات الانقطاع السنوية المتوقعة لأنظمة الحافلات الثلاثية ذات أعداد مختلفة من المغذيات الخارجة.

الفصل 11

تقييم وثوقية محطات التوزيع الثانوية المترابطة

1-11 مقدمة

إن اعتماد المجتمع على أنظمة توزيع الكهرباء الحديثة والمعقدة قد أبرز الحاجة إلى تحليل موضوعي وكمي لوثوقية الخدمة. وحيث يجب أن يعمل نظام توزيع الطاقة الجيد بمستوى كافٍ من الوثوقية، لذلك، فقد أخذت فلسفة تصميم شبكات التوزيع في الاعتبار دائمًا المخاطر الناجمة عن احتمال انقطاع التيار الكهربائي. تشير الدراسات ذات الصلة إلى أنه قد تم بذل جهود مكثفة في هذا المجال بهدف تطوير نماذج وتقنيات مناسبة لتقييم وثوقية موزعات الطاقة. من بين هذه الطرق المعروفة والتقليدية: مجموعة القطع، ومجموعة الربط، وشجرة الأحداث، وشجرة الأعطال، ومنهج التفكيك. وفي الآونة الأخيرة، استُخدمت أساليب جديدة مثل خوارزميات الشبكة البايزية (BN) وتقنيات تحليل الفترات لإجراء تحليل وثوقية أنظمة التوزيع المعقدة. مع ذلك، لا تزال هذه الأساليب تفتقر إلى صيغ رياضية قابلة للتعميم على معظم الأنظمة العملية المستخدمة في موزعات الطاقة، وفي كثير من الحالات يصعب حلها. لذلك، لا تزال هناك حاجة لإيجاد طريقة فعالة ومريحة لحساب وثوقية توزيع الطاقة.

في دراسات وثوقية التوزيع، عادةً ما يُستخدم نموذج مفصل لمحطة التغذية الثانوية وجميع عناصر التغذية الفرعية التابعة لها. يتم جمع مؤشرات نقاط التحميل عند كل موقع من مواقع العملاء، ويتم إيجاد مؤشرات مركبة على مستوى النظام بناءً على جميع مؤشرات نقاط التحميل. في معظم دراسات الوثوقية هذه، لا يُقدم سوى القليل من التفاصيل عن محطة التغذية الثانوية، وقد يتم تمثيلها إما بمحول ولوحة مفاتيح أو مجرد قضيب توصيل ولوحة مفاتيح.

إن تضمين نموذج مفصل لمحطة التغذية الثانوية في دراسات وثوقية التوزيع يمكن أن يزيد بشكل كبير من حجم وتعقيد نموذج النظام بأكمله. أحد الحلول الممكنة لهذه المشكلة هو فصل تحليل وثوقية المحطات الثانوية عن تحليل وثوقية مغذيات التوزيع. وهذا من شأنه أن يسمح باستخدام أدوات متخصصة في تحليل وثوقية المحطات الثانوية مع الحفاظ على حجمها وتعقيدها منخفضين.

في هذه الفقرة ، سوف يتم شرح طريقة بسيطة موجهة نحو حساب وثوقية بعض أنظمة التوزيع المعقدة مثل أنظمة الحلقة وأنظمة الشبكة ذات قضبان التوزيع الثلاثية.

على اية حال ، في الأنظمة المعقدة التي تتكون من حلقات أو شبكات، يوجد جزء من الموزع له معدل عطل ووقت إصلاح، يحدد متوسط وقت التشغيل ومتوسط وقت التوقف عند نقاط التحميل، ويُعتبر وقت الإصلاح هنا متغيرًا عشوائيًا، وفي كثير من الحالات تكون بعض قيم أوقات الإصلاح صغيرة جدًا بحيث يمكن إهمالها عند كل نقطة تحميل. علاوة على ذلك، فإن مكونات شبكة التوزيع والمغذيات هي بشكل حصري تقريبًا من النوع الأرضي/ الداخلي وبالتالي لا ينبغي أخذ تأثير الطقس السيئ (العاصف) على وثوقية المكونات في الاعتبار. لذا، تُعامل معدلات الأعطال على أنها ثابتة في ظل نماذج الاسترداد الأسي ويمكن إهمال تأثير المكونات ذات معدلات الأعطال المتغيرة مع الزمن على وثوقية التوزيع. لذلك، يمكن الحصول على تحليل وثوقية كامل مع حذف وقت الإصلاح وتعديل التوافرية (الوثوقية) وعدم التوافرية (ساعة/ سنة) عند كل نقطة تحميل/ تغذية باستخدام الطرق البسيطة للاحتمالات ونظرية المجموعات

اقتصرت التقنيات والطرق الموصوفة في الفصل الرابع لتقييم الوثوقية على الأنظمة والشبكات ذات تصميم مبني على الربط المتسلسل (التوالي) والربط التوازي. لكن معظم الأنظمة في العالم الحقيقي إما أنها لا تمتلك بنى بسيطة أو تعمل بمنطق تشغيلي معقد. ولحل الشبكات أو الأنظمة المعقدة، يلزم استخدام تقنيات نمذجة وتقييم إضافية لتقييم وثوقية هذه الشبكات. سيقدم هذا الفصل نماذج لتقييم وثوقية تكوينات الشبكات المعقدة. وسيتم توضيح النماذج الأساسية لحلول الشبكات المعقدة باستخدام أمثلة عددية.

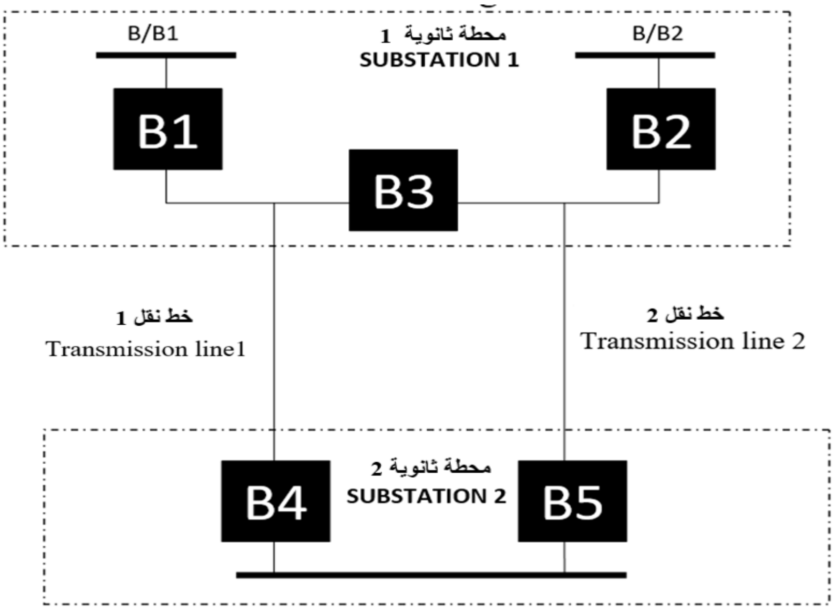
لا يُعد تحليل وثوقية تكوينات الأنظمة المربوطة على التوالي والتوازي معقدًا بشكل عام، ويعتمد على تطبيق مجموعة من المعادلات الأساسية. ومع ازدياد تعقيد تكوينات الشبكة، تصبح هذه المنهجيات الأساسية للتوالي والتوازي غير فعالة حيث توجد العديد من تقنيات تحليل الوثوقية لتقييم وثوقية تكوينات الشبكات المعقدة.

11-2 ثقييم وثوقية محطتين ثانويتين مرتبطتين مع بعضهما

لنفترض وجود محطتين ثانويتين متصلتين بخطين كما هو موضح في الشكل 11-1. تحتوي المحطة الثانوية 1 على ثلاثة قواطع (داخل لوحات التوزيع) لحماية المغذيين (الدائرتين)، ولذلك يُشار إليها باسم "نظام القاطع ونصف".

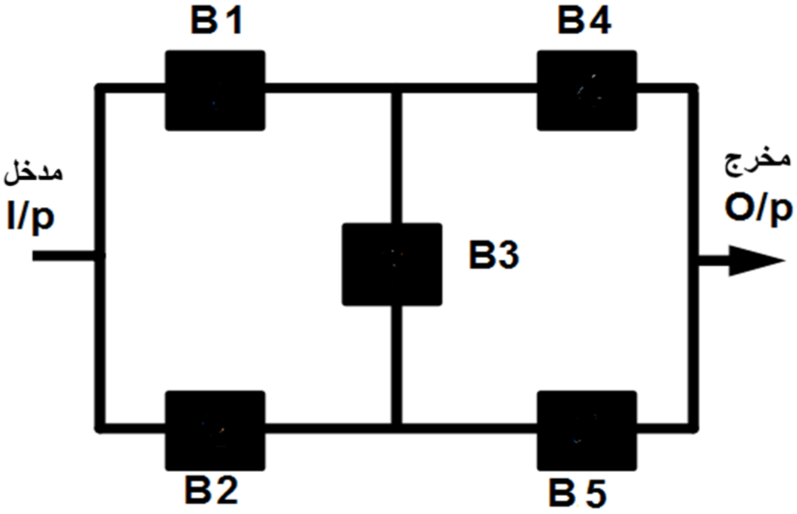
من منظور الوثوقية، لنفترض أن هذا النظام "يعمل" إذا تم توصيل الطاقة من أحد قضيبي التوزيع على الأقل (BB/1 أو BB/2). كذلك، يفشل النظام إذا تعذر توصيل الطاقة من أي من قضيبي توزيع الطاقة. فاذا أريد إنشاء مخطط منطقي لهذا النظام. نلاحظ أن أنماط الفشل التالية تمثل هذا النظام تكون:

(B1, B2)، (B4, B5)، (B1, B3, B5)، (B2, B3, B4)



الشكل 11-1 محطتان ثانويتان متصلتان بخطين.

يمكننا تمثيل أنماط الفشل هذه باستخدام المخطط المنطقي 11-2 التالي.



الشكل 11-2 المخطط المنطقي لمنظومة التوزيع المبينة في الشكل 11-1.

هذا الشكل11-2 يمثل من الناحية الكهربائية مخطط القنطرة المألوف الذي يمكن حله بإحدى التقنيات التالية:

1. نظرية المجموعات (النهج الاحتمالي) Set theory (probabilistic approach)
2. طريقة مجموعة القطع Cut Set Method
3. طريقة مجموعة الربط Tie – Set Method
4. التفكيك Decomposition

5. تحويل دلتا ستار Delta-Star Transformation

6. أشجار الأحداث Event Trees

7. أشجار الأعطال Fault Trees

هذه الطرق والمنهجيات الشائعة الاستخدام في تقييم وثوقية الشبكات عمليًا يمكن تلخيصها كالآتي:

(1) طرق تعداد الحالات (طرق فضاء الأحداث)

State enumeration methods (event space methods)

(2) طرق اختزال الشبكة Network reduction methods

(3) طرق تعداد المسارات. Path enumeration methods

3-11 طرق تعداد الحالات STATE ENUMERATION METHODOLOGIES

تتضمن هذه الطرق تحديد جميع الحالات الممكنة والمتنافية لنظام ما، وذلك بناءً على حالات مكوناته. وتُعرَّف الحالة بسرد العناصر الناجحة والفاشلة في النظام. فبالنسبة لنظام ما يحتوي على n عدد من العناصر أو مكونًا، يوجد n^2 حالة ممكنة، وبالتالي فإن نظامًا مكونًا من 5 مكونات سيكون له 32 حالة. ويصبح عدد الحالات الممكنة غير عملي حسابيًا بسرعة بالنسبة للأنظمة التي تحتوي على عدد كبير من العناصر أو المكونات، كما هو موضح في الجدول11-1.

الجدول 11-1 عدد الحالات الممكنة لعدد معين من المكونات

عدد المكونات (العناصر)	عدد الحالات الممكنة
1	2
2	4
4	16
5	32
10	1024
20	1,048,576
25	33,554,432
50	1,125,899,906,842,620
60	1,152,921,504,606,850,000
75	37,778,931,862,957,200,000,000
90	1,237,940,039,285,380,000,000,000,000
100	1,267,650,600,228,230,000,000,000,000,000

يتم تحديد الحالات التي تؤدي إلى تشغيل نظام الشبكة بنجاح، ويتم حساب احتمالية حدوث كل حالة ناجحة. وتكون وثوقية النظام هي عبارة عن مجموع احتمالات جميع الحالات الناجحة. وتُعد طريقة شجرة الأحداث The event tree طريقة نموذجية تستخدم منهجية تعداد الحالات، وهي فعالة حسابيًا للأنظمة التي تحتوي على عدد قليل من المكونات (مثل خمسة أو أقل).

4-11 أساليب اختزال الشبكة NETWORK REDUCTION METHODS

تجمع أساليب اختزال الشبكة بين الأنظمة الفرعية المتسلسلة والمتوازية والمتسلسلة-المتوازية حتى ينتج نظام غير متسلسل-متوازي، لا يمكن اختزاله أكثر من ذلك. تُستخدم بعد ذلك نظريات التحليل للحصول على موثوقية النظام. بشكل عام، تكون أساليب اختزال الشبكة مفيدة إذا كان نظام الشبكة قيد الدراسة يتكون من عقدة مصدر واحدة وعقدة مصب واحدة. لا يمكن حل مشكلة عقد المصب والمصدر المتعددة بسهولة باستخدام منهجيات اختزال الشبكة.

5-11 طرق تعداد المسارات: مجموعة الربط الصغرى

Path Enumeration Methods: Minimum Tie Set

تُعدّ طرق تعداد المسارات أدوات قيّمة للغاية لتقييم وثوقية النظام. ومن أشهر هذه الطرق تحليل مجموعة الربط وتحليل مجموعة القطع، حيث يستخدم الأول مفهوم المسار الأصغر، بينما يستخدم الثاني مفهوم مجموعة القطع الصغرى. ويقصد بالمسار هو مجموعة من العناصر (المكونات) التي تُشكّل اتصالاً بين المدخلات والمخرجات عند اجتيازها في اتجاه مُحدّد.

المسار الأصغر هو المسار الذي لا يتم فيه اجتياز أي عقدة أكثر من مرة واحدة أثناء السير فيه. ويُرمز للمسار الأصغر رقم i بالرمز Ti، حيث $i = 1,n$. بافتراض أن أي مسار قابل لتوصيل الطاقة و التشغيل وأن النظام يعمل بكفاءة، عليه فإن وثوقية النظام تكتب كما يأتي:

$$R_s = P\left[\bigcup_{i=1}^{n} T_i\right] \qquad T_i,\ i = 1,\ n$$

حيث يمثل P [ ] احتمال أن يكون مسار واحد في الأقل من المسارات التي عددها n قابلاً للتشغيل وU يشير إلى عملية الاتحاد للمجموعات.

التعريفات:

• مجموعة الربط V هي مجموعة من المكونات التي يؤدي نجاحها إلى نجاح النظام، أي أن وجود جميع المكونات في أي مجموعة ربط يربط المدخل بالمخرج في مخطط المنطق.

• مجموعة الربط الصغرى T هي مجموعة ربط لا تُعتبر المجموعة المتبقية منها مجموعة ربط بعد إزالة أي من عناصرها. وهذا يعني أنه يجب أن تنجح جميع مكونات مجموعة الربط الصغرى لكي ينجح النظام. ويوضح المثال التالي حساب وثوقية شبكة توزيع قنطرية بطريقة مجموعات الربط Tie Sets (مسارات النجاح)

مثال 11-1 :

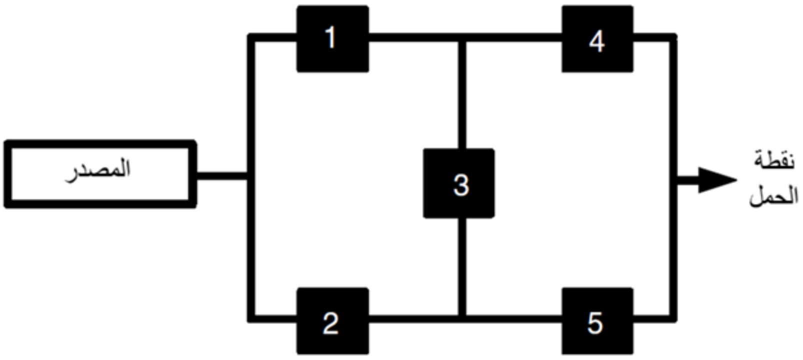
لنتبصرفي الشكل 11-3 الذي يوضح تكوين شبكة القنطرة. من هذا الشكل يمكن أن تُحدد مجموعة الربط للمكونات ضمن هذه شبكة والتي تُشكل مسارًا متصلًا يربط عقدة (أوعقد) مصدر الطاقة بنقطة (أو نقاط) تحميل الشبكة (الشكل11-3). ثم يُعاد تكوين شبكة القنطرة لتمكين تصور مجموعات الربط الصغرى حيث تُعرّف مسارات النجاح (أي مجموعات الربط الصغرى) لتكوين شبكة القنطرة وكما يأتي:

المسار 1 - [1,4] = T1

المسار 2 - [2,5] = T2

المسار 3 - [1,3,5] = T3

المسار 4 - [2,3,4] = T4



الشكل11-3. شبكة القنطرة نظام توزيع الطاقة.

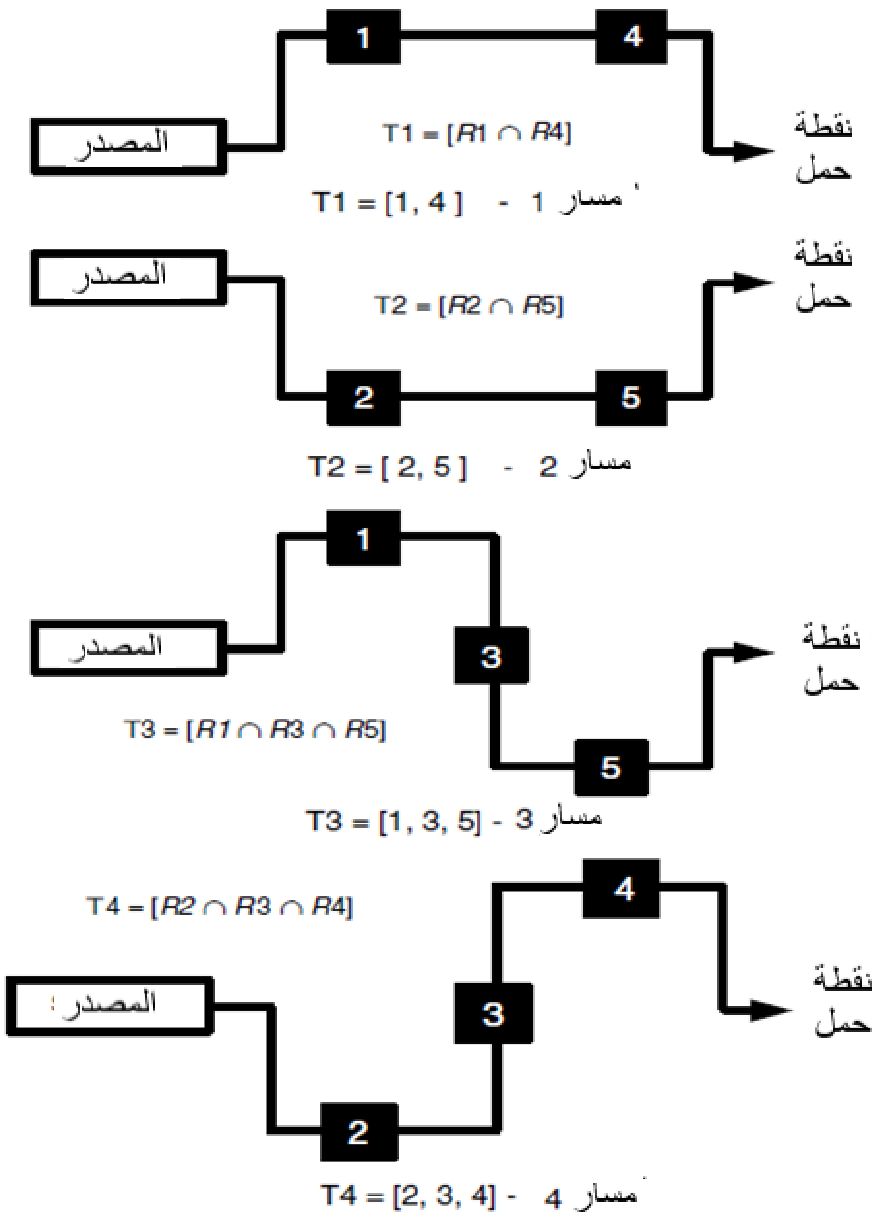
يوضح الشكل11-4 وصفًا مرئيًا لتحديد الحد الأدنى لمجموعات الربط المذكورة أعلاه حيث منه يمكن تعريف وثوقية تكوين شبكة القنطرة على النحو الآتي:

$$R_s = P(T1 \cup T2 \cup T3 \cup T4)$$

وعدد الحدود N لتعبير وثوقية النظام Rs هو :

$$N = 2^n - 1 = 2^4 - 1 = 15$$

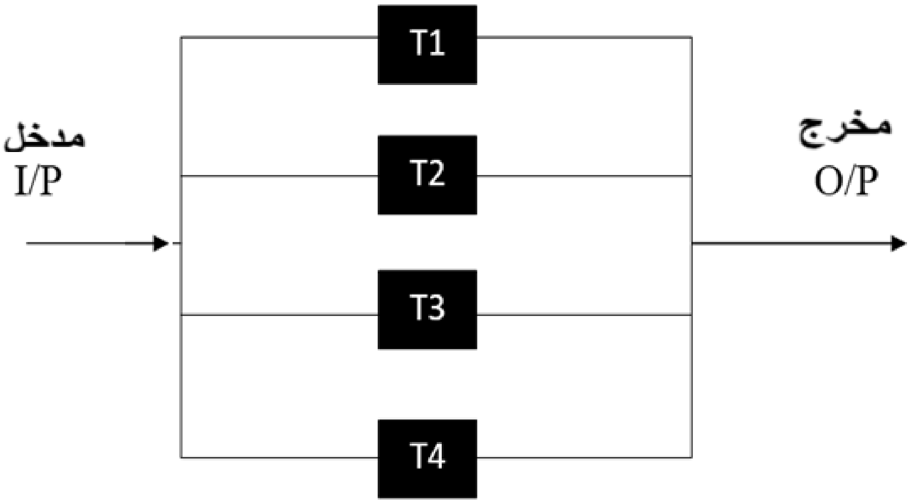
حيث n هو عدد المسارات التشغيلية أو مجموعات الربط.



الشكل11-4 تعريف مجموعات الربط لتكوين شبكة القنطرة.

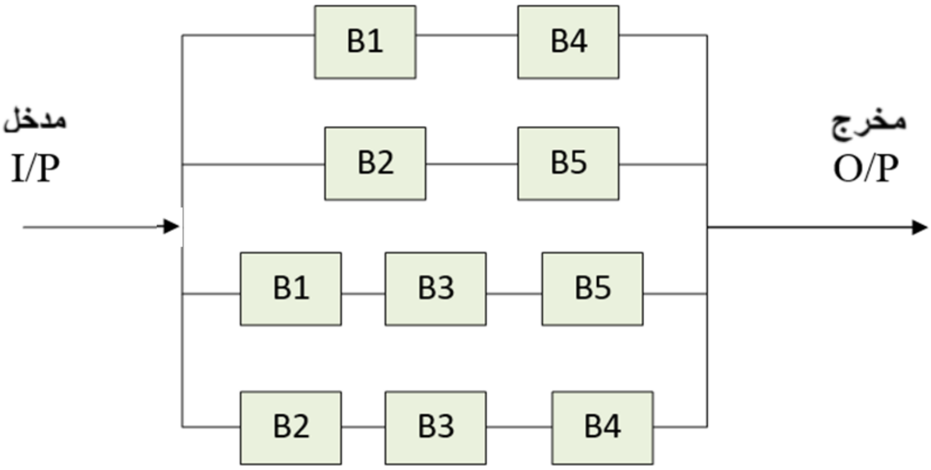
$$R_{sys} = P(S) = P(T1 \cup T2 \cup T3 \cup T4)$$

يمكننا تطوير نموذج منطقي لنظامنا على النحو المبين في الشكل 11-5:



الشكل 11-5 مخطط منطقي لمجموعة الربط المكافئة لمكونات القنطرة.

الآن يمكن نمذجة جميع كتل مجموعات الربط منطقيًا كسلسلة من مكوناتها المكونة، لذلك يمكننا توسيع مخطط المنطق على النحو التالي:



الشكل11-6 المخطط المنطقي النهائي لمجموعة الربط المكافئ .

$$P_{sys} = P(T1 \cup T2 \cup T3 \ \cup T4)$$

$$R_{sys} = P(T1) + P(T2) + P(T3) + P(T4) - P(T1 \cap T2) - P(T1 \cap T3) - P(T1 \cap T4) - P(T2 \cap T3) - P(T2 \cap T4) - P(T3 \cap T4) + P(T1 \cap T2 \cap T3) + P(T1 \cap T2 \cap T4) + P(T1 \cap T3 \cap T4) + P(T2 \cap T3 \cap T4) - P(T1 \cap T2 \cap T3 \cap T4)$$

حيث :

احتمال أن تكون مجموعة الربط موثوقة = R(Ti)

R(Ti) = (أي مسار ناجح يربط بين عقدتي المصدر ونقطة الحمل)

عليه تكون وثوقية الشبكة :

$$R_s = P(\mathrm{T1} \cup \mathrm{T2} \cup \mathrm{T3} \cup \mathrm{T4})$$

وبفتح الحدود نحصل على

$$\begin{aligned} R_s = & R(\mathrm{T1}) + R(\mathrm{T2}) + R(\mathrm{T3}) + R(\mathrm{T4}) - R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T2}) - R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T3}) - R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T4}) + \cdots \\ & + \cdots - R(\mathrm{T2} \cap \mathrm{T3}) - R(\mathrm{T2} \cap \mathrm{T4}) - R(\mathrm{T3} \cap \mathrm{T4}) + R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T2} \cap \mathrm{T3}) + \cdots \\ & + \cdots + R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T2} \cap \mathrm{T4}) + R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T3} \cap \mathrm{T4}) + R(\mathrm{T2} \cap \mathrm{T3} \cap \mathrm{T4}) + \cdots \\ & + \cdots - R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T2} \cap \mathrm{T3} \cap \mathrm{T4}) \end{aligned}$$

وبفرض أن

$$R1 = R2 = R3 = \mathrm{R}4 = R5 = R$$

$$\begin{aligned} R(T1) &= R1 \times R2 = R^2 \\ R(T2) &= R2 \times R5 = R^2 \\ R(T3) &= R1 \times R3 \times R5 = R^3 \\ R(T4) &= R2 \times R3 \times R4 = R^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(\mathrm{T1} \cap T2) &= R1 \times R2 \times R4 \times R5 = R^4 \\ R(\mathrm{T1} \cap T3) &= R1 \times R3 \times R4 \times R5 = R^4 \\ R(\mathrm{T1} \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 = R^4 \\ R(\mathrm{T2} \cap T3) &= R1 \times R2 \times R3 \times R5 = R^4 \\ R(\mathrm{T2} \cap T4) &= R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^4 \\ R(\mathrm{T3} \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T2} \cap \mathrm{T3}) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T2} \cap \mathrm{T4}) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(\mathrm{T1} \cap \mathrm{T2} \cap \mathrm{T3} \cap \mathrm{T4}) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(\mathrm{T2} \cap \mathrm{T3} \cap \mathrm{T4}) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \end{aligned}$$

$$R_s = R(T1)+R(T2)+R(T3)+R(T4)-R(T1\cap T2)-R(T1\cap T3)-R(T1\cap T4)$$
$$R(T2\cap T3)-R(T2\cap T4)-R(T3\cap T4)+R(T1\cap T2\cap T3)+R(T1\cap T2$$
$$\cap T4)+R(T1\cap T3\cap T4)+R(T2\cap T3\cap T4)-R(T1\cap T2\cap T3\cap T4)$$

ولما تم فرض أن $R1=R2=R3=R4=R5=R$

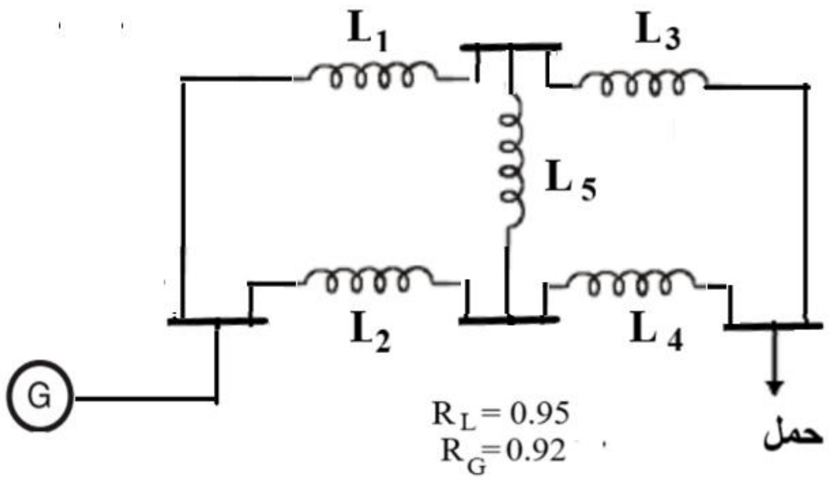
لذا فان وثوقية شبكة القنطرة تكون :

واذا كانت $R=0.95$ $R_s = 4R^4-6R^5+4R^5-R^5 = 4R^4-3R^5$

$$R_s = 4(0.814506)-3(0.773781)$$
$$= 0.936682$$

مثال: 11-2

لنفترض نظامًا رباعي الحافلات الموضح في الشكل11-7 . استخدم طريقة الربط لتحديد وثوقية النظام، وعدم وثوقيته، ووقت انقطاع التيار المتوقع بالساعات سنويًا. افترض أن وثوقية المولد RG تساوي 0.92، ووثوقية كل خط RL1=RL2=RL3 RL4=RL5 تساوي 0.95.



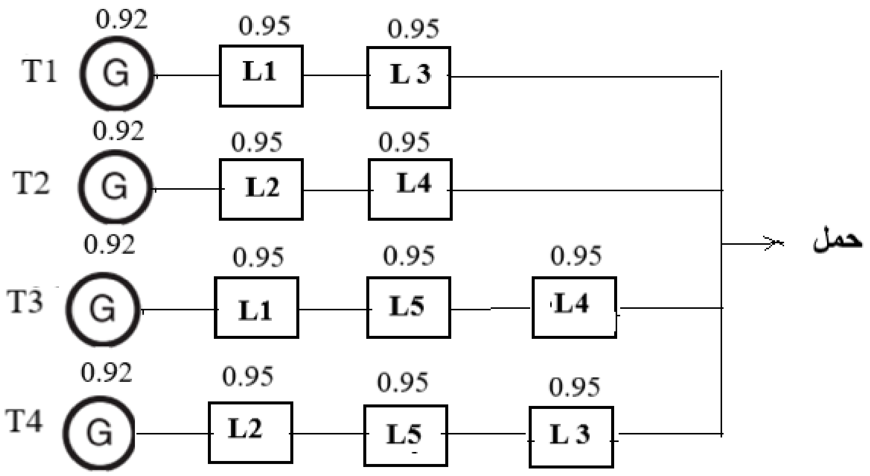
الشكل 11-7 .

الحل :

في البداية لحل هذا المثال يجب تكوين المخطط المنطقي لهذه المنظومة التي تشبه بالأساس نظام القنطرة السابق . ويبين الشكل 11-8 المخطط المنطقي النهائي لمجموعة الربط المكافئ .

$$P_{sys} = P(T1\cup T2\cup T3\ \cup T4)$$

$$R_{sys} = P(T1) + P(T2) + P(T3) + P(T4) - P(T1 \cap T2) - P(T1 \cap T3) - P(T1 \cap T4) - P(T2 \cap T3) - P(T2 \cap T4) - P(T3 \cap T4) + P(T1 \cap T2 \cap T3) + P(T1 \cap T2 \cap T4) + P(T1 \cap T3 \cap T4) + P(T2 \cap T3 \cap T4) - P(T1 \cap T2 \cap T3 \cap T4)$$



الشكل 11-8 المخطط المنطقي النهائي لمجموعة الربط المكافئ للمثال 11- 2 .

لكن :

$$T1 = 0.92 \times 0.95^2, T2 = 0.92 \times 0.95^2, T3 = 0.92 \times 0.95^3,$$
$$T4 = 0.92 \times 0.95^3$$

$$R_{sys} = 0.92 \times 0.95^2 + 0.92 \times 0.95^2 + 0.92 \times 0.95^3 + 0.92 \times 0.95^3 - 0.92 \times 0.95^4 - 0.92 \times 0.95^4 - 0.92 \times 0.95^4 - 0.92 \times 0.95^4 - 0.92 \times 0.95^4 - 0.92 \times 0.95^4 + 0.92 \times 0.95^5 + 0.92 \times 0.95^5 + 0.92 \times 0.95^5 + 0.92 \times 0.95^5 - 0.92 \times 0.95^5 = 0.915198$$

$$Q_{sys} = 1 - R_{sys} = 0.084804$$

$$Tf_{sys} = 8760 Q_{sys} = 742.86$$ ساعة

مثال 11-3 :

تطبيق طريقة وثوقية مجموعات الربط (مسارات النجاح) مطبقة على شبكة التوزيع.

في أدناه رسم تخطيطي أحادي الخط لنظام توزيع شركة كهرباء خاصة ، كما هو موضح في الشكل 11-9.

وكما هو الحال بالنسبة لطريقة تعداد الحالات المُقدم في الفقرة 11-3 ، فإن معيار نجاح النظام هو الطاقة المُوصلة إلى جميع الأحمال.

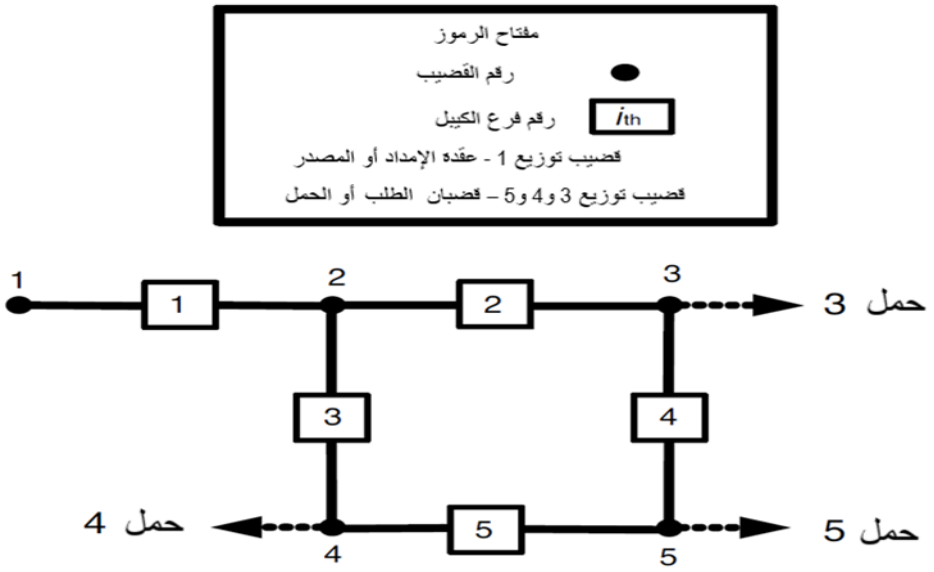
يُعرَّف الحد الأدنى لمجموعة الربط (أو المسارات) للشبكة المذكورة أعلاه على النحو التالي:

T1= [1, 2, 4, 5]—المسار 1: فشل المكون 3

T2= [1, 3, 4, 5]—المسار 2: فشل المكون 2

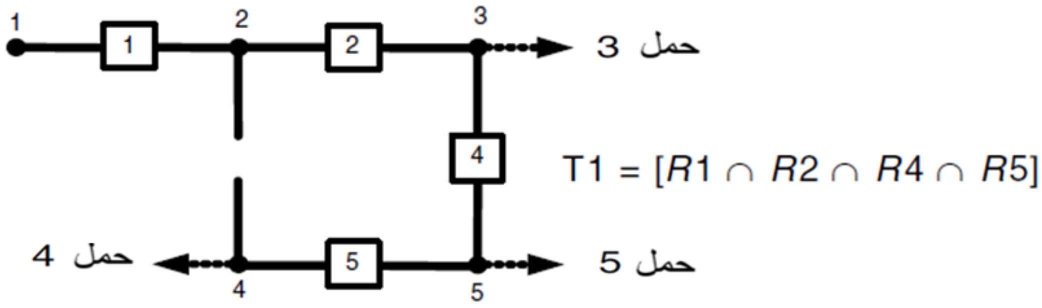
T3= [1, 2, 3, 4]—المسار 3: فشل المكون 5

T4= [1, 2, 3, 5]—المسار 4: فشل المكون 4.

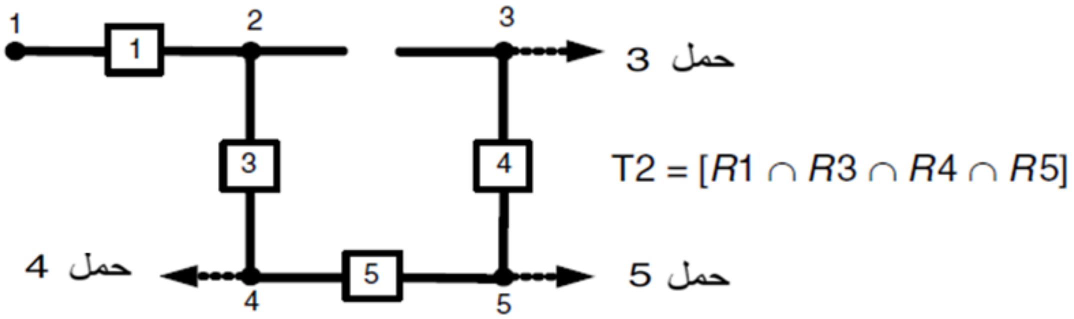


الشكل 11- 9 نظام توزيع كهربائي توضيحي.

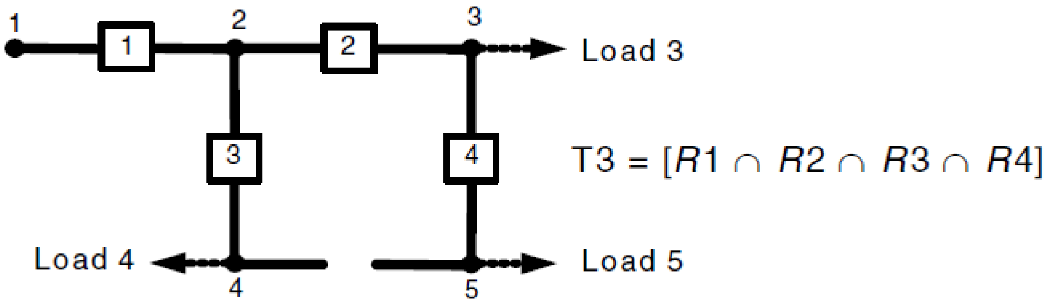
يظهر الوصف المرئي لتحديد مجموعات الربط الصغرى المذكورة أعلاه في الأشكال من 11-10 إلى 11-13.



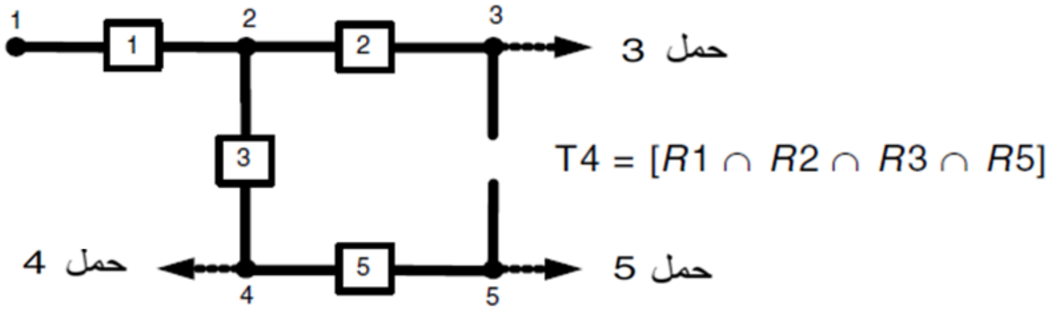
الشكل 11-10 تعريف مجموعة الربط T1. T1= [1,2,4,5]—المسار 1. . .فشل المكون 3.



الشكل11-11. تعريف مجموعة الربط T2. T2= [1,3,4,5]—المسار 2. . .فشل المكون 2.



الشكل11-12. تعريف مجموعة الربط T3. T3= [1,2,3,4]—المسار 3. . .فشل المكون 5.



الشكل11-13. تعريف مجموعة الربط T4. T4= [1,2,3,5]—المسار 4. . .فشل المكون 4.

$$R_s = R(T1 \cup T2 \cup T3 \cup T4)$$

$$\begin{aligned} R_s = & R(T1) + R(T2) + R(T3) + R(T4) - R(T1 \cap T2) - R(T1 \cap T3) - R(T1 \cap T4) + \cdots \\ & + \cdots - R(T2 \cap T3) - R(T2 \cap T4) - R(T3 \cap T4) + R(T1 \cap T2 \cap T3) + \cdots \\ & + \cdots + R(T1 \cap T2 \cap T4) + R(T1 \cap T3 \cap T4) + R(T2 \cap T3 \cap T4) + \cdots \\ & + \cdots - R(T1 \cap T2 \cap T3 \cap T4) \end{aligned}$$

وبفرض أن : $R = R5 = R4 = R3 = R2 = R1$

$$\begin{aligned} R(T1) &= R1 \times R2 \times R4 \times R5 = R^4 \\ R(T2) &= R1 \times R3 \times R4 \times R5 = R^4 \\ R(T3) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 = R^4 \\ R(T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R5 = R^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(T1 \cap T2) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T1 \cap T3) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T1 \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T2 \cap T3) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T2 \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T3 \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(T1 \cap T2 \cap T3) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T1 \cap T2 \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T1 \cap T3 \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T2 \cap T3 \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \\ R(T1 \cap T2 \cap T3 \cap T4) &= R1 \times R2 \times R3 \times R4 \times R5 = R^5 \end{aligned}$$

$$R_s = 4R^4 - 6R^5 + 4R^5 - R^5 = 4R^4 - 3R^5$$

وإذا كانت $R = 0.95$ ، عليه

$$\begin{aligned} R_s &= 4(0.814506) - 3(0.773781) \\ &= 0.936682 \end{aligned}$$

6-11 طرق تعداد المسارات: مجموعة القطع الصغرى

Path Enumeration Methods: Minimum Cut Set

تُعرَّف مجموعة القطع بأنها مجموعة من العناصر التي يؤدي تعطلها إلى تعطل النظام بغض النظر عن حالة العناصر الأخرى في النظام. أما مجموعة القطع الصغرى فهي مجموعة لا تحتوي على أي مجموعة فرعية مناسبة من العناصر التي يؤدي تعطلها وحده إلى تعطل النظام. ومجموعة القطع الصغرى هي مجموعة إذا أُزيل أي عنصر منها، فإن العناصر المتبقية مجتمعةً لا تُشكّل مجموعة قطع. ويُرمز إلى المسار الأدنى رقم i من بين المسارات الممكنة البالغ عددها n بالرمز Ci. وبافتراض أن أي مسار قابل للتشغيل وأن النظام يعمل بكفاءة، فإن وثوقية النظام هي:

$$R_s = 1 - P\left[\bigcup_{i=1}^{n} C_i\right] \quad \text{or} \quad Q_s = P\left[\bigcup_{i=1}^{n} C_i\right]$$

حيث يمثل P[ ] احتمال فشل واحد على الأقل من المسارات n و U يشير إلى الاتحاد.

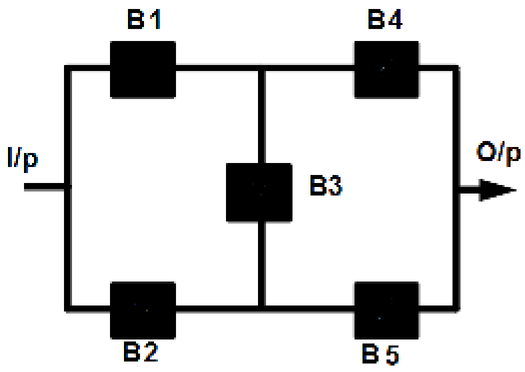
التعريفات:

• مجموعة القطع K هي مجموعة من المكونات التي يؤدي تعطلها إلى تعطل النظام، أي أن إزالة جميع المكونات في أي مجموعة قطع تفصل المدخلات عن المخرجات في مخطط المنطق.

• مجموعة القطع الدنيا C هي مجموعة قطع لا تُعتبر المجموعة المتبقية منها مجموعة قطع بعد إزالة أي من عناصرها. وهذا يعني أنه يجب أن تتعطل جميع مكونات مجموعة القطع الدنيا حتى يحدث تعطل في النظام.

مثال:

أوجد مجموعات القطع في الشكل 11-14 .

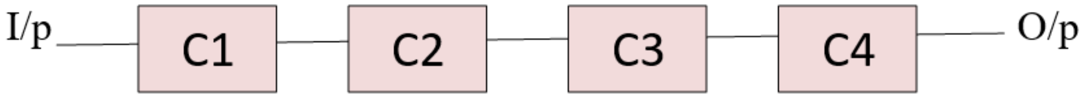


الشكل 11-14 .

الحل: مجموعات القطع هي:

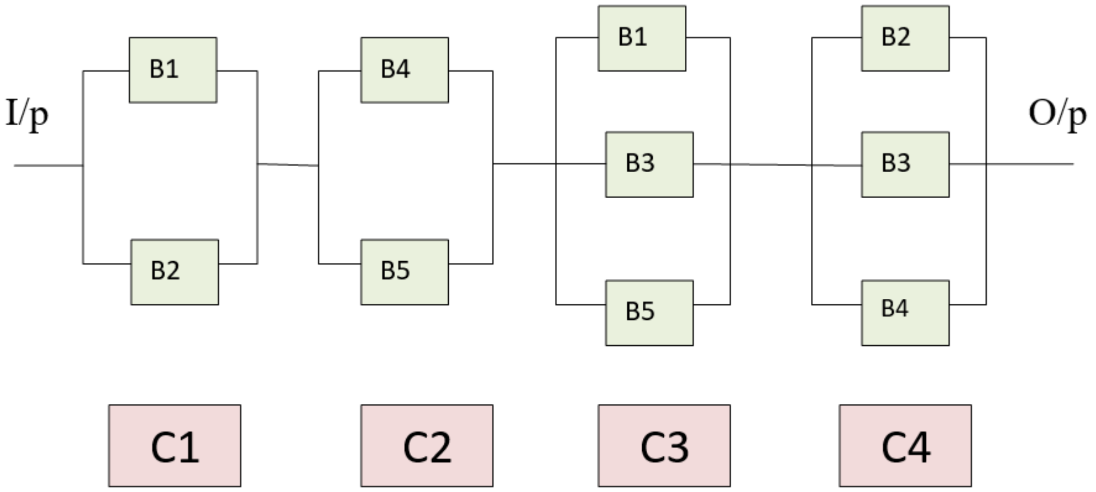
(B2, B3, B4) ،(B1, B3, B5) ،(B4, B5) ،(B1, B2)

$$Q_{sys} = P\left(F_{sys}\right) = P(F_{C1} \cup F_{C2} \cup F_{C3} \cup F_{C4})$$



الشكل11-15: مخطط منطقي مكافئ لمجموعات القطع .

الآن يمكن نمذجة جميع كتل مجموعات القطع منطقيًا كتركيبة متوازية لمكوناتها، لذلك يمكننا توسيع المخطط المنطقي للشكل 11-14 على النحو التالي:



الشكل 11-16 مجموعة القطع يتم تعيين هذه المجموعات وكما في الشكل 11-15

لدينا هنا أربعة أحداث:

$$Q_{sys} = P(C1 \cup C2 \cup C3 \cup C4)$$

$$\begin{aligned} Q_{sys} = {} & P(C1) + P(C2) + P(C3) + P(C4) - P(C1 \cap C2) - P(C1 \cap C3) \\ & - P(C1 \cap C4) - P(C2 \cap C3) - P(C2 \cap C4) - P(C3 \cap C4) \\ & + P(C1 \cap C2 \cap C3) + P(C1 \cap C2 \cap C4) + P(C1 \cap C3 \cap C4) \\ & + P(C2 \cap C3 \cap C4) - P(C1 \cap C2 \cap C3 \cap C4) \end{aligned}$$

مثال 11-4:

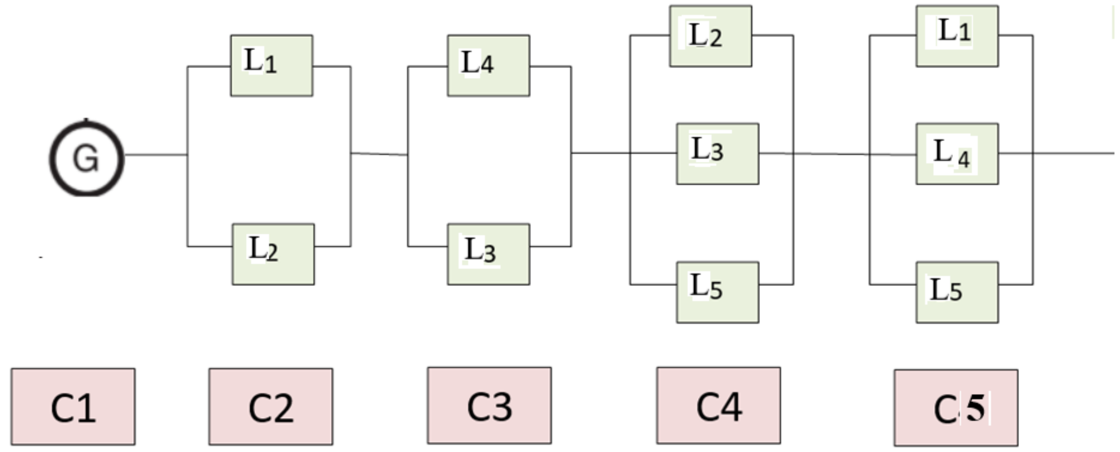
لنفترض نظام قضبان التوزيع الأربع نفسه الموضح في الشكل 11-6 من المثال السابق. استخدم طريقة مجموعة القطع موثوقية النظام، وعدم وثوقيته، ووقت الانقطاع المتوقع بالساعات سنويًا. افترض أن وثوقية المولد RG = 0.92، وموثوقية كل خط RL1 = RL2 = RL3 = RL4 = RL5 =0.95.

الحل :

RG = 0.92 QG = 1-RG =1-0.92= 0.08

RL = 0.95 QL = 1- RL =1- 0.95 = 0.05

باستخدام طريقة مجموعة القطع يتم تعيين هذه المجموعات وكما في الشكل 11-17 .



الشكل 11-17.

$$Q_{sys} = P[(C1)U(C2)U(C3)\ U(C4)U(C5)]$$

$$\begin{aligned}Q_{sys} = {} & P(C1) + P(C2)+P(C3) + P(C4) + P(C5) - P(C1 \cap C2) \\ & - P(C1 \cap C3) - P(C1 \cap C4) - P(C1 \cap C5) - P(C2 \cap C3) \\ & - P(C2 \cap C4) - P(C2 \cap C5) - P(C3 \cap C4) - P(C3 \cap C5) \\ & - P(C4 \cap C5) + P(C1 \cap C2 \cap C3) + P(C1 \cap C2 \cap C4) \\ & + P(C1 \cap C2 \cap C5) + P(C2 \cap C3 \cap C4) + P(C2 \cap C3 \cap C5) \\ & + P(C3 \cap C4 \cap C5) + P(C1 \cap C3 \cap C4) + P(C1 \cap C4 \cap C5) \\ & + P(C2 \cap C4 \cap C5) - P(C1 \cap C2 \cap C3 \cap C4) \\ & - P(C1 \cap C2 \cap C3 \cap C5) - P(C2 \cap C3 \cap C4 \cap C5) \\ & - P(C1 \cap C3 \cap C4 \cap C5) - P(C1 \cap C2 \cap C4 \cap C5) \\ & + P(C1 \cap C2 \cap C3 \cap C4 \cap C5)\end{aligned}$$

لكن:

$$P(C1) = Q_{C1} = Q_G = 0.08$$

$$P(C2) = Q_{C2} = Q_{L1}Q_{L2} = 0.05^2$$

$$P(C3) = Q_{C3} = Q_{L3}Q_{L4} = 0.05^2$$

$$P(C4) = Q_{C4} = Q_{L2}Q_{L3}Q_{L5} = 0.05^3$$

$$P(C5) = Q_{C5} = Q_{L1}Q_{L4}Q_{L5} = 0.05^3$$

بتعويض القيم في المعادلة اعلاه ينتج :

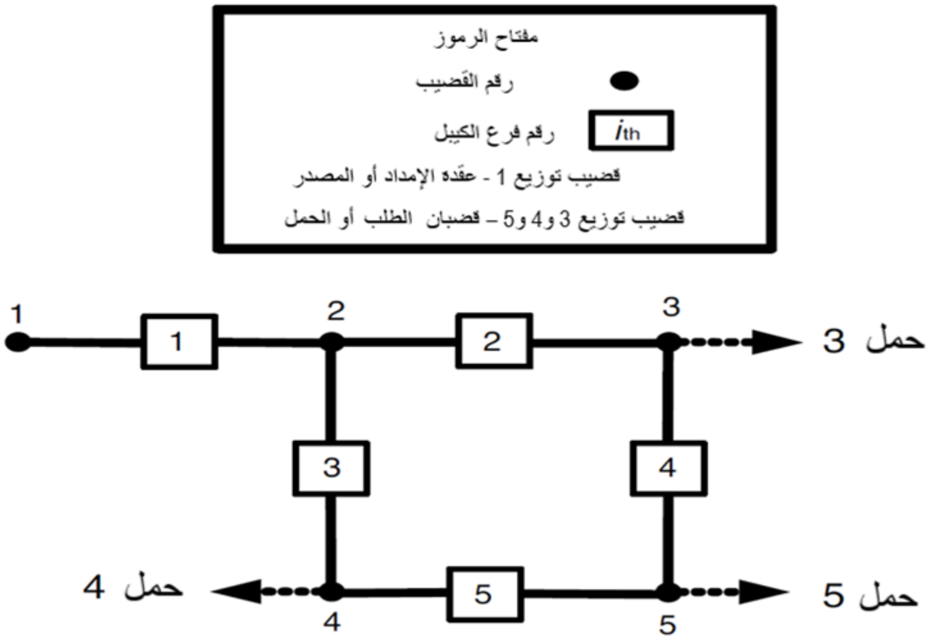
$$0.084801 = Q_{system}$$

$$P_{system} = 1 - Q_{system} = 1 - 0.084801 = 0.915198$$

$T_{system} = Q_{system} \times 8760 = 0.084801 \times 8760 = 742.26$ ساعة

مثال 11-5 :

تطبيق طريقة وثوقية مجموعات القطع (مسارات الفشل) على شبكة توزيع تُوضِّح منهجية موثوقية مجموعات القطع باستخدام نظام توزيع المرافق كما هو موضح في الشكل 11-18.



الشكل11-18. تكوين شبكة قنطرية.

معيار نجاح النظام هو توصيل الطاقة إلى جميع الأحمال.

بناءً على معايير موثوقية النظام، فإن الحد الأدنى لمجموعات القطع للشبكة المذكورة أعلاه هو:

C1 = [1] - فشل المكون 1

C2 = [2, 3] - فشل المكونان 2 و3

C3 = [2, 4] - فشل المكونان 2 و4

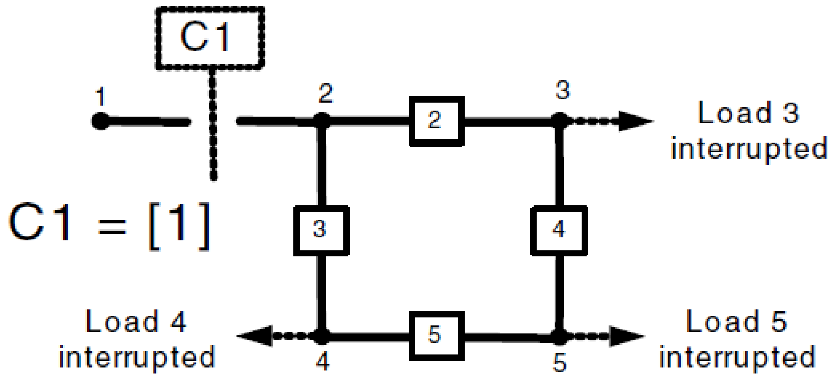
C4 = [2, 5] - فشل المكونان 2 و5

C5 = [3, 4] - فشل المكونان 3 و4

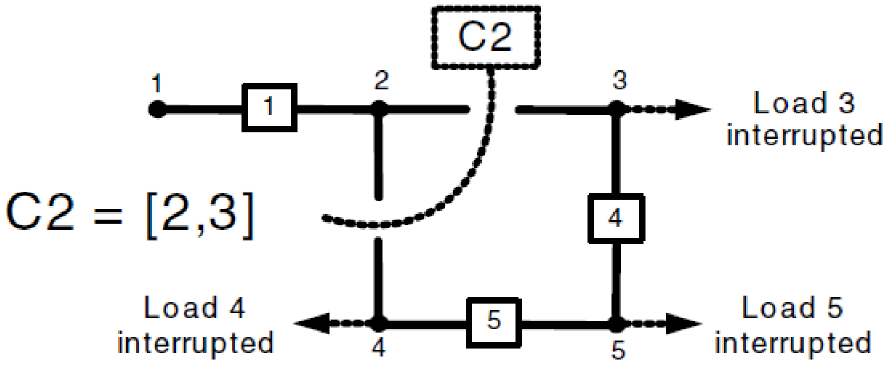
C6 = [3, 5] - فشل المكونان 3 و5

C7 = [4, 5] - فشل المكونان 4 و5

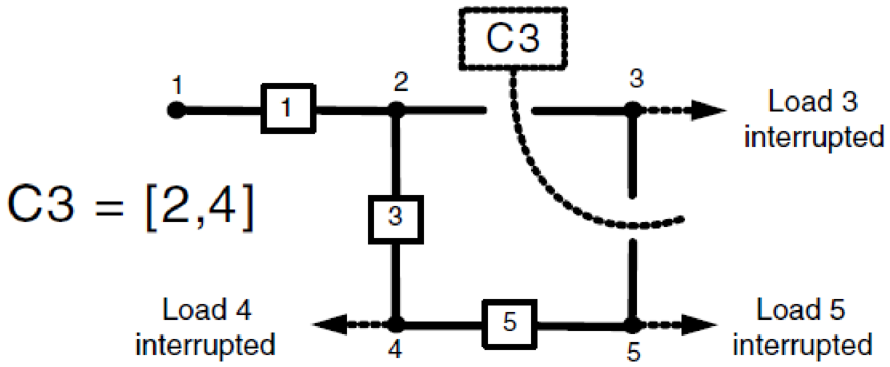
يظهر وصف مرئي لتحديد مجموعات القطع المذكورة أعلاه في الأشكال من 11-19 إلى 11-26 .



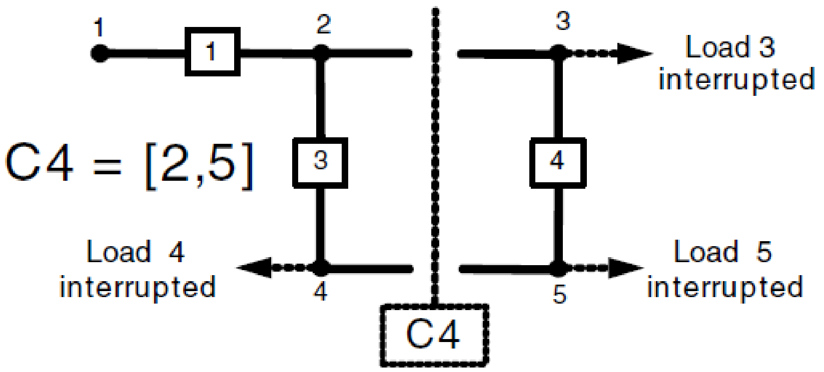
الشكل 11-19 تعريف مجموعة القطع C1. C1 = [1]... فشل المكون 1.



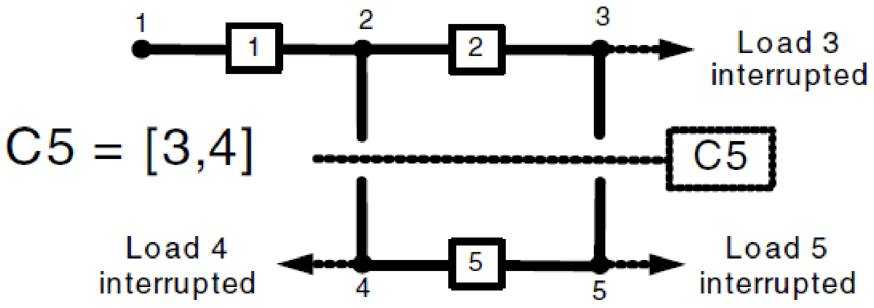
الشكل11-20 . تعريف مجموعة القطع C2. C2 = [2,3]... فشل المكونان 2 و3.



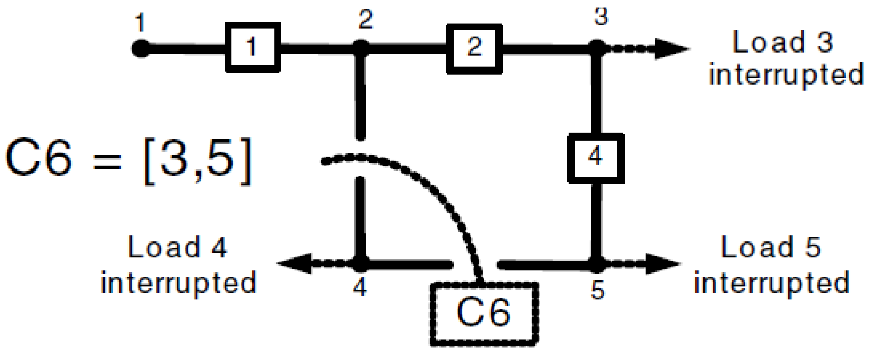
الشكل 11-21 تعريف مجموعة القطع C3. C3 = [2,4]... فشل المكونان 2 و4.



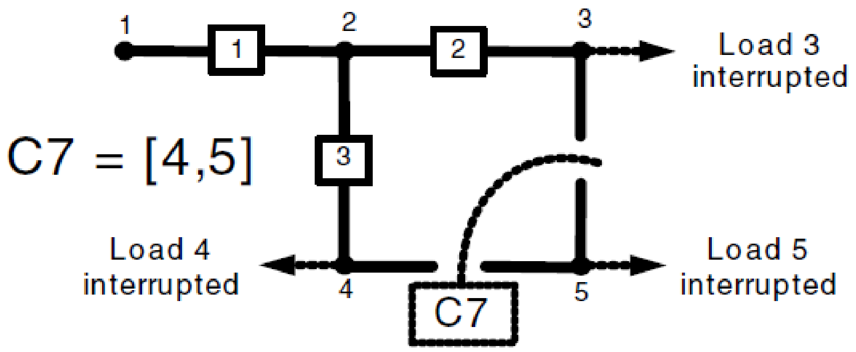
الشكل 11-22 تعريف مجموعة القطع C4. C4 = [2,5]... فشل المكونان 2 و5.



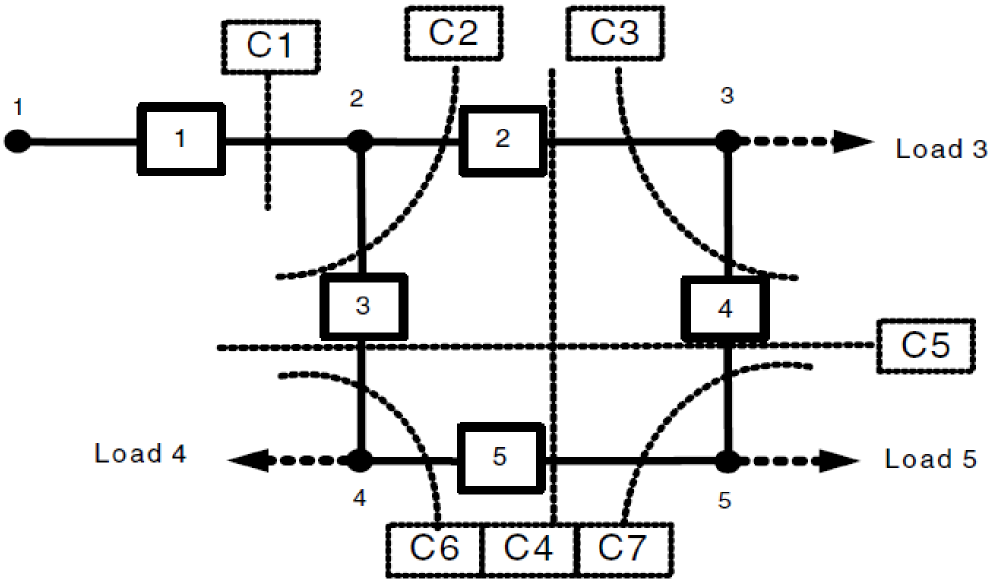
الشكل 11-23 تعريف مجموعة القطع C5. C5 = [3,4]... فشل المكونان 3 و4.



الشكل 11-24 تعريف مجموعة القطع C6. C6 = [3,5]... فشل المكونان 3 و5.



الشكل 11-25 تعريف مجموعة القطع C7. C7 = [4,5]... فشل المكونان 4 و5.



الشكل 11-26 تعريف جميع القطع.

$$Q_s = P\left[\bigcup_{i=1}^{n} C_i\right] \qquad \text{أو} \qquad R_s = 1 - P\left[\bigcup_{i=1}^{n} C_i\right]$$

سبعة تركيبات قطع من الدرجة الأولى وتعبيرات احتمالاتها

$Q(C_1)$	$Q(C_2)$	$Q(C_3)$	$Q(C_4)$	$Q(C_5)$	$Q(C_6)$	$Q(C_7)$
Q_1	$Q_2 \times Q_3$	$Q_2 \times Q_4$	$Q_2 \times Q_5$	$Q_3 \times Q_4$	$Q_3 \times Q_5$	$Q_4 \times 5$

واحد وعشرون تركيبة قطع من الدرجة الثانية وتعبيراتها الاحتمالية

$Q(C_1 \cap C_2)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3$	$Q(C_1 \cap C_3)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_4$	$Q(C_1 \cap C_4)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_5)$ $Q_1 \times Q_3 \times Q_4$	$Q(C_1 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_2 \cap C_3)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4$	$Q(C_2 \cap C_4)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_5)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4$	$Q(C_2 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_3 \cap C_4)$ $Q_2 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_3 \cap C_5)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_3 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_3 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_4 \cap C_5)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_4 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_4 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_4 \times Q_5$
				$Q(C_5 \cap C_6)$ $Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_5 \cap C_7)$ $Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
					$Q(C_6 \cap C_7)$ $Q_3 \times Q_4 \times Q_5$

خمسة وثلاثون تركيبة قطع من الدرجة الثالثة وتعبيراتها الاحتمالية

$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4$ $\times$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_5)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_5)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_5)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_1 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
				$Q(C_1 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_5)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_5)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_2 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
				$Q(C_2 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_3 \cap C_4 \cap C_5)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_3 \cap C_4 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_3 \cap C_4 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_3 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_3 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
				$Q(C_3 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_4 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_4 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
				$Q(C_4 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
				$Q(C_5 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_3 \times Q_4 \times Q_5$

خمسة وثلاثون تركيبة قطع من الدرجة الرابعة وتعبيراتها الاحتمالية

$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_5)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4 \cap C_5)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$

(يتبع)

		$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_1 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_1 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_2 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q(C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_3 \cap C_4 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_3 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
			$Q(C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$ $Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$

واحد وعشرون تركيبة قطع من الرتبة الخامسة وتعبيراتها الاحتمالية

$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5)$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_6)$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_7)$
$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_6)$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_7)$
	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_6 \cap C_7)$
		$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6)$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_7)$
	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4 \cap C_6 \cap C_7)$
		$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
		$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6)$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_7)$
	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_6 \cap C_7)$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
		$Q(C_1 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
		$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6)$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_7)$
	$Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_6 \cap C_7)$	$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
	$Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
	$Q(C_2 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$	$Q(C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
	$Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$

سبعة تركيبات قطع من الدرجة السادسة وتعبيراتها الاحتمالية

$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6)$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_7)$
$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_6 \cap C_7)$	$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$	$Q(C_1 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$
$Q(C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$	
$Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$	

تركيبة قطع واحدة من الدرجة السابعة وتعبيراتها الاحتمالية

$Q(C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4 \cap C_5 \cap C_6 \cap C_7)$
$Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4 \times Q_5$

$$Q_s = P\left[\bigcup_{i=1}^{7} C_i\right]$$

بافتراض أن $Q1 = Q2 = Q3 = Q4 = Q5 = Q$ (للمكون)

التوليفات (واحد في كل مرة)	التعبير	الإشارة
1	$Q + 6Q^2$	+
2	$18Q^3 + 3Q^4$	−
3	$4Q^3 + 28Q^4 + 3Q^5$	+
4	$19Q^4 + 16Q^5$	−
5	$6Q^4 + 15Q^5$	+
6	$Q^4 + 6Q^5$	−
7	Q^5	+

اشتقاق تعبير لنظام التوزيع بدلالة R

بالتعويض عن $Q = 1/R$ في معادلة Qs، نحصل على:

ملحوظة :

$$Q = 1 - R$$
$$Q^2 = 1 - 2R + R^2$$

$$Q^3 = 1 - 3R + 3R^2 - R^3$$
$$Q^4 = 1 - 4R + 6R^2 - 4R^3 + R^4$$
$$Q^5 = 1 - 5R + 10R^2 - 10R^3 + 5R^4 - R^5$$

$$\begin{aligned} Q_s &= [1-R] + [6-12R+6R^2] + [-14+42R-42R^2+14R^3] + \cdots \\ &\quad + [11-44R+66R^2-44R^3+11R^4] + [-3+15R-30R^2 \\ &\quad + 30R^3-15R^4+3R^5] \\ Q_s &= 1-4R^4+3R^5 \\ R_s &= 1-Q_s = 4R-3R^5 \end{aligned}$$

إذا كانت $Q = 0.05$ و $R = 0.95$، فإن:

$$\begin{aligned} Q_s &= 0.063318 \\ R_s &= 1-Qs = 0.063318 \end{aligned}$$

7-11 تصميم أنظمة الطاقة الصناعية والتجارية لضمان الوثوقية

تقدَّم هذه الفقرة وصفٌ لكيفية إجراء تنبؤات كمية بشأن الوثوقية والتوافرية للتكوينات الجديدة المقترحة لأنظمة توزيع القدرة الكهربائية للمنشآت الصناعية. على أية حال ، قد يستقبل نظام توزيع الطاقة الصناعية الطاقة بفولتية 11 كيلوفولت من شركة الكهرباء، ثم يوزعها في جميع أنحاء المصنع لاستخدامها في مواقع مختلفة. ومن الأسئلة التي تُطرح غالبًا أثناء تصميم نظام توزيع الطاقة، ما إذا كانت هناك طريقة لإجراء مقارنة كمية لمعدل الأعطال وعدد ساعات التوقف القسري سنويًا لنظام انتقائي ثانوي مع نظام انتقائي أولي ونظام شعاعي بسيط. يمكن استخدام هذه المقارنة في اتخاذ قرارات المفاضلة بين التكلفة والوثوقية، والتكلفة والتوافرية، عند تصميم نظام توزيع الطاقة. كما يمكن أخذ التكلفة التقديرية لانقطاعات التيار الكهربائي في مواقع المحطات المختلفة في الاعتبار عند اتخاذ القرار بشأن نوع نظام توزيع الطاقة المستخدم. وبالتالي، يمكن أن تستند القرارات إلى "إجمالي تكلفة التملك على مدى العمر الإنتاجي للمعدات" بدلاً من "التكلفة الأولية".

في الأمثلة التالية، تُؤخذ حالات انقطاع التيار الكهربائي القسري فقط في الاعتبار. ويُفترض أن الصيانة الدورية ستُجرى في الأوقات التي لا تكون فيها الحاجة إلى قدرة خرج بفولتية 400 فولت قائمة. يمكن تقدير معدل تكرار حالات الانقطاع الدورية ومتوسط مدتها، وإذا لزم الأمر، يمكن إضافتها إلى حالات الانقطاع القسري المذكورة في الأمثلة . عند إجراء دراسة وثوقية، من الضروري تحديد ماهية عطل قدرة بفولتية 400 فولت.

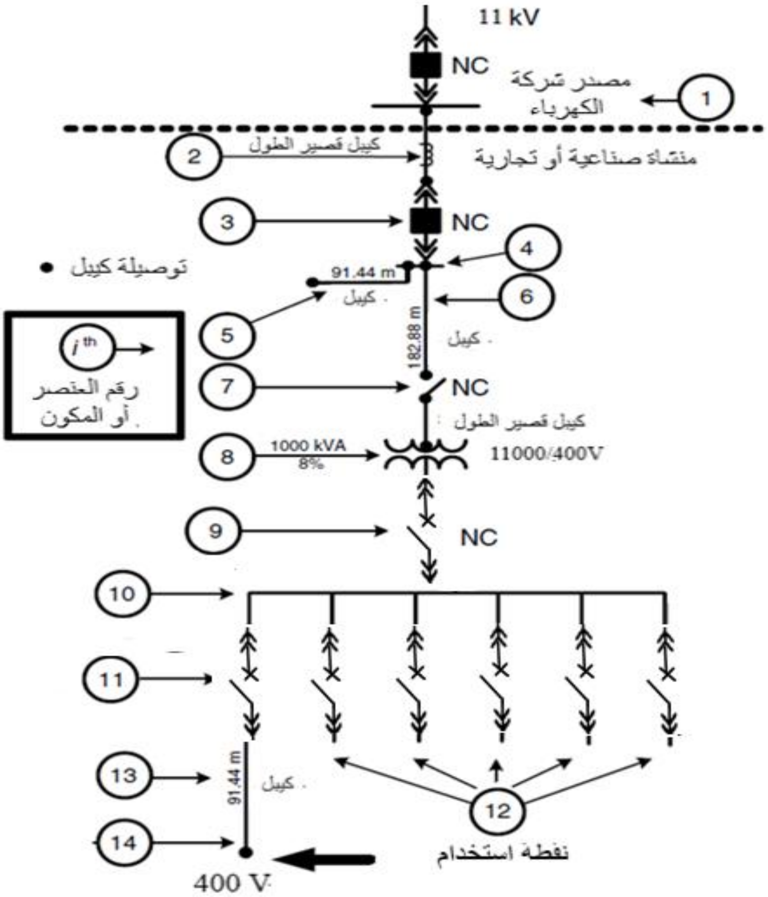
1. فقدان كامل لأكثر من دورة واحدة
2. فقدان كامل لأكثر من 10 دورات
3. فقدان كامل لأكثر من 5 ثوانٍ
4. فقدان كامل لأكثر من دقيقتين

سيتم استخدام التعريف الموصوف في 3 أعلاه في الأمثلة التي سيتم دراستها في هذا الفصل. هذا التعريف للعطل قد يؤثر على تحديد السرعة اللازمة لمعدات الفصل التلقائي المستخدمة في أنظمة الفصل الانتقائي الأولي أو الثانوي. في بعض الحالات، عند إجراء دراسات الوثوقية، قد يكون من الضروري تحديد مفهوم "الانقطاع الكامل للقدرة الداخلة" بشكل أدق، على سبيل المثال، "انخفاض الفولتية إلى أقل من 70%".

وللتوضيح العملي للقارئ سيتم في هذا الفقرة دراسة وتحليل عدة أمثلة لأنظمة توزيع الطاقة الصناعية الشائعة ذات الفولتية المنخفضة وسيتم أولاً أخذ مثال لنظام توزيع شعاعي بسيط مستعمل في أغلب المنشآت الصناعية والتج ارية .

11-7-1 مثال 1 :نظام توزيع شعاعي بسيط

يوضح الشكل 11-27 نظامًا شعاعيًا بسيطًا. يتم استلام القدرة الكهربائية من شركة الكهرباء بفولتية 11 كيلوفولت. تمر الطاقة عبر قاطع دائرة كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت داخل المصنع، ثم عبر كيبل بطول 300 مترموضوع في قناة تحت الأرض، ثم عبر مفتاح فصل مغلق، إلى محول كهربائي يخفض الفولتية إلى 400 فولت، ثم عبر قاطع دائرة كهربائية رئيسي بفولتية 400 فولت، ثم قاطع دائرة كهربائية ثانٍ بفولتية 400 فولت، ثم عبر كيبل بطول 150 متر في قناة فوق الأرض، إلى النقطة التي تُستخدم فيها القدرة الكهربائية في المصنع.



الشكل 11-27 نظام توزيع شعاعي بسيط .

بعد الإطلاع على معدلات الفشل والإصلاح من معيار IEEE 493-2007 الخاص بالمنشآت الصناعية والتجارية واستخدامها لحل هذا المثال لنظام التوزيع الشعاعي البسيط كانت نتائج حسابات الوثوقية والتوافرية معطاة في الجدول 11-2.

الاستنتاجات: للمثال 1 لنظام توزيع شعاعي بسيط

يُعدّ مصدر الطاقة الكهربائية المساهم الأكبر في كلٍّ من معدل الأعطال وعدد ساعات التوقف القسري سنويًا عند نقطة استخدام 400 فولت. ويمكن تحقيق تحسين ملحوظ في كلٍّ من معدل الأعطال وعدد ساعات التوقف القسري سنويًا من خلال وجود مصدرين للطاقة من شبكة الكهرباء بجهد 11 كيلو فولت. وتُبيّن الأمثلة 2 و3 و4 التحسينات التي يُمكن الحصول عليها باستخدام "نظام انتقائي أولي primary selective system"، بينما يُبيّن المثال 5 التحسينات التي يُمكن الحصول عليها باستخدام "نظام انتقائي ثانوي secondary selective system".

الجدول 11-2 نظام شعاعي بسيط: حساب معدل الفشل وساعات التوقف القسري سنويًا عند نقطة استخدام 480 فولت - مثال 1.

رقم المكون أو العنصر	المكون أو العنصر Component	(أعطال/سنة) λ (failures/year)	λr (ساعات التوقف القسري سنويًا)
1	مصدر قدرة كهربائية 11 kV من شركة الكهرباء	1.956000	2.582000
2	نظام الحماية والتحكم الأساسي	0.000600	0.003000
3	قاطع دائرة مفرغ من الهواء VCB 11 kV	0.001850	0.000925
4	لوحة مفاتيح ذات قضيب توزيع- معزول 11 kV	0.004100	0.153053
5	كيبل 11kV داخل انبوب كانديوت 300 متر تحت الأرض	0.002124	0.033347
6	نهايات كيبلات 11kV	0.002960	0.002220
7	مفتاح فصل (مغلق)	0.001740	0.001740
8	محول	0.010800	1.430244
9	قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت	0.000210	0.001260
10	لوحة مفاتيح ذات قضيب توزيع- معزول 400 فولت	0.009490	0.069182
11	قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت	0.000210	0.001260
12	(5) قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت (لا تعمل أثناء الفتح)	0.000095	0.000378
13	كيبل (400 فولت)؛ 150 متر داخل انبوب كانديوت فوق الأرض	0.000021	0.000168
14	نهايات الكيبل (2) عند 400 فولت	0.000740	0.000555
	الإجمالي عند نقطة استخدام 400 فولت	1.990940	4.279332

ملاحظة: λr هو ناتج ضرب معدل الفشل في مدة الإصلاح "r".

يُعدّ المحوّل ثاني أكبر مُساهم في ساعات التوقف القسري سنويًا. يتميز المحوّل بمعدل أعطال منخفض جدًا، إلا أن فترة انقطاع التيار الطويلة التي تبلغ 132.43 ساعة بعد العطل تُؤدي إلى عدد كبير من ساعات التوقف القسري سنويًا. ويُعدّ قاطع الدائرة الكهربائية 11 كيلوفولت ثالث أكبر مُساهم في ساعات التوقف القسري سنويًا، ورابع أكبر المُساهمين هي كيبلات 11 كيلوفولت ونقاط التوصيل. يُلخّص الجدولان 11-3 و11-4 معدل الأعطال وساعات التوقف القسري سنويًا لكل عنصر أو مكون مُساهم.

الجدول 11-3 نظام شعاعي بسيط - مثال 1 - الترتيب النسبي لمعدلات الفشل.

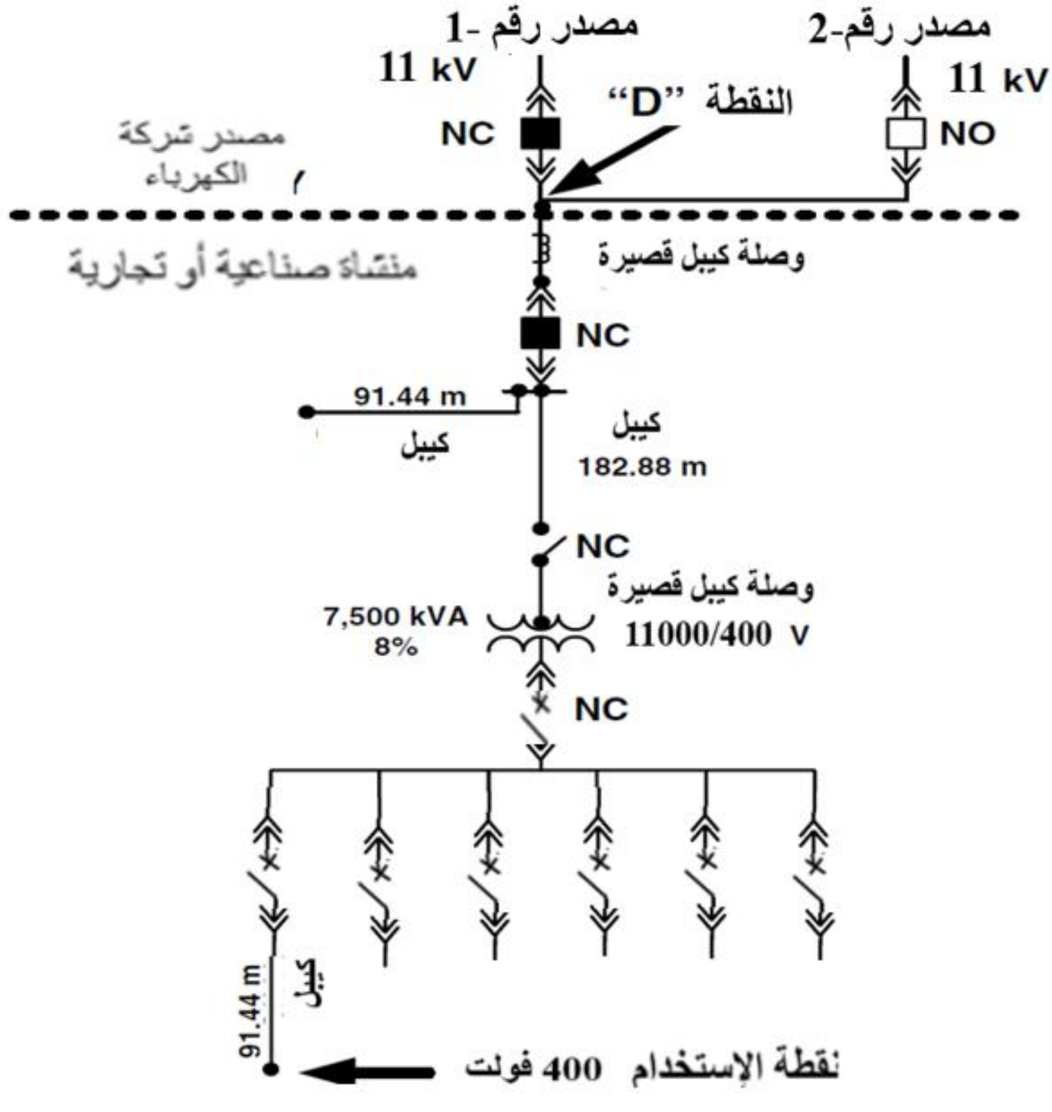
التصنيف	المكون أو العنصر	λ (أعطال/سنة)
1	مصدر قدرة كهربائية 11 kV من شركة الكهرباء	1.956000
8	محول	0.010800
10	لوحة مفاتيح ذات قضيب توزيع- معزول 400 فولت	0.009490
4	لوحة مفاتيح ذات قضيب توزيع- معزول 11 kV	0.004100
6	نهايات كيبلات 11kV	0.002960
5	كيبل 11kV داخل انبوب كانديوت 300 مترتحت الأرض	0.002124
3	قاطع دائرة مفرغ من الهواء VCB 11 kV	0.001850
7	مفتاح فصل (مغلق)	0.001740
14	نهايات الكيبل (2) عند 400 فولت	0.000740
2	نظام الحماية والتحكم الأساسي	0.000600
9	قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت	0.000210
11	قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت	0.000210
	إجمالي الطاقة عند نقطة استخدام 400 فولت	1.990940

الجدول 11-4 نظام شعاعي بسيط - مثال 1 - الترتيب النسبي لساعات التوقف القسري السنوي.

التصنيف	المكون أو العنصر	λ (أعطال/سنة)
1	مصدر قدرة كهربائية 11 kV من شركة الكهرباء	2.582000
8	محول	1.430244
4	لوحة مفاتيح ذات قضيب توزيع- معزول 11 kV	0.153053
10	لوحة مفاتيح ذات قضيب توزيع- معزول 400 فولت	0.069182
5	كيبل 11kV داخل انبوب كانديوت 300 مترتحت الأرض	0.033347
2	قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت	0.003823
6	نظام الحماية والتحكم الرئيسي	0.003000
7	توصيلات الكيبل 11 كيلو فولت (8)	0.002220
12	مفتاح عزل (في حاوية)	0.001740
9	قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت	0.001260
11	قاطع دائرة فولتية منخفضة 400 فولت	0.001260
3	قاطع دائرة مفرغ من الهواء VCB 11 kV	0.000925
	إجمالي عند نقطة استخدام 400 فولت	4.279332

11-7-2 مثال 2: تحليل وثوقية نظام الانتقاء الأولي لإمداد الطاقة الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت

يوضح الشكل 11-28 نظام الانتقاء الأولي لإمداد الطاقة الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت. سيتم تناول مثالين فرعيين.



الشكل 11-28 نظام الانتقاء الأولي لإمداد القدرة الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت.

مثال 2أ: بعد انقطاع التيار الكهربائي عن مصدر الكهرباء رقم 1، افترض أن زمن التحويل اليدوي إلى مصدر الكهرباء رقم 2 هو 9 دقائق.

مثال 2ب: افترض أن زمن التحويل التلقائي أقل من 5 ثوانٍ بعد حدوث انقطاع التيار.

ملاحظة: لا يُحتسب انقطاع التيار الكهربائي بفولتية 400 فولت لمدة تقل عن 5 ثوانٍ كعطل.

- الوصف: نظام انتقائي أساسي لإمداد القدرة بفولتية 11 كيلوفولت

هذا نظام شعاعي بسيط مع إضافة مصدر كهرباء ثانٍ بفولتية 11 كيلوفولت من شركة الكهرباء؛ مصدر الكهرباء الثاني مفصول عادةً. في حال تعطل مصدر الكهرباء الأول بفولتية 11 كيلوفولت من الشبكة، يتم تشغيل مصدر الكهرباء الثاني بفولتية 11 كيلوفولت من الشبكة ليحل محل المصدر المتعطل. بافتراض أن مصدري الكهرباء من الشبكة متزامنان.

- النتائج: نظام انتقائي أولي لإمدادات القدرة الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت

مثال 2أ: إذا استغرق التحويل إلى مصدر كهرباء ثانٍ 9 دقائق بعد عطل المصدر الأول، فسيكون هناك انقطاع في التيار الكهربائي لمدة 9 دقائق (الجدول11-5).

الجدول 11-5 نظام انتقائي أساسي لإمداد الطاقة الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت؛ حساب معدل الفشل وساعات التوقف القسري سنويًا عند نقطة استخدام بفولتية 400 فولت - مثال 2أ (9 دقائق يدويًا) وقت التحويل.

رقم المكون أو العنصر	المكون أو العنصر Component	(أعطال/سنة) λ (failures/year)	λr ، (ساعات التوقف القسري سنويًا)
1	مصدر كهرباء بفولتية 11 كيلوفولت من شركة الكهرباء	1.644000	
2	نظام الحماية والتحكم الاساسي	0.000600	
3	قاطع دائرة كهربائية معدنى مغلف بفولتية 11	0.001850	
	كيلو فولت	1.646450	0.246968
	فقدان مصدري الكهرباء بفولتية 11 كيلوفولت في آن واحد	0.312000	0.162240
المجموع إلى النقطة D		1.958450	0.409208
4	قضيب توزيع لوحة مفاتيح كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت - معزول	0.004100	0.153053
5	كيبل (11كيلوفولت)؛ 350 متر، قناة تحت الأرض	0.002124	0.033347
6	نهايات الكابلات (8) [1] عند 11 كيلو فولت	0.002960	0.002220
7	مفتاح فصل (مغلق)	0.001740	0.001740
8	محول	0.010800	1.430244
9	قاطع دائرة كهربائية معدني مغلف بفولتية 400 V	0.000210	0.001260
10	قضيب توزيع لوحة مفاتيح 400 فولت - مكشوف	0.009490	0.069182
11	قاطع دائرة كهربائية معدني مغلف ذي فولتية 400 فولت	0.000210	0.001260
12	قواطع دوائر معدنية مغلفة ذوات فولتية 400 فولت(5) (تعطلت أثناء الفتح)	0.000095	0.000378
13	كيبل (400 فولت)؛ 90 متر،داخل قناة فوق الأرض	0.000021	0.000168
14	نهايات كيبلات (2) عند 400 فولت	0.000740	0.000555
	إجمالي القدرة عند نقطة الاستخدام 400 فولت	1.990940	2.102614

باستخدام بيانات معيار IEEE 493-2007، لإمدادات الطاقة الكهربائية ذات الدائرة المزدوجة، سيحدث هذا 1.644 مرة في السنة (1.956 - 0.312). هذا بالإضافة إلى فقدان كلا مصدري الكهرباء في وقت واحد 0.312 مرة في السنة، بمتوسط مدة انقطاع 0.52 ساعة. بجمع بيانات إمداد الطاقة هذه، بالنسبة للنظام التوزيع الشعاعي البسيط، سيؤدي ذلك إلى تقليل ساعات التوقف القسري سنويًا عند نقطة استخدام 400 فولت من 4.3033 إلى 2.1301. أما معدل الفشل، فسيبقى كما هو عند 1.9896 حالة فشل/ سنة.

مثال 2ب: إذا استغرق التحويل إلى مصدر كهرباء ثانٍ أقل من 5 ثوانٍ بعد تعطل المصدر الأول، فلن يحدث أي انقطاع في إمداد الطاقة الكهربائية (الجدول11-6). يحدث انقطاع إمداد الطاقة فقط عند تعطل كلا المصدرين في آنٍ واحد. يُفترض أن البيانات الواردة في الكتاب الذهبي تنطبق على فقدان دائرتي إمداد الطاقة في آنٍ واحد. وهذا يُعادل 0.312 انقطاع/سنة بمتوسط مدة انقطاع 0.52 ساعة (أي، lr 0.1622). يُبين الجدول 11-7مقارنة بين نتائج نظام التوزيع الشعاعي البسيط والنظام الانتقائي الأساسي لإمداد طاقة كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت.

الجدول 11-6 نظام انتقائي أولي لإمداد الطاقة الكهربائية بفولتية 11كيلوفولت: حساب تردد ومدة انقطاعات التيار الكهربائي عند نقطة الاستخدام (حمل 400 فولت) - مثال 2ب.

رقم المكون أو العنصر	المكون أو العنصر Component	(أعطال/سنة) λ (failures/year)	λr (ساعات التوقف القسري سنويًا)
1	مصدر كهرباء بفولتية 11 كيلوفولت من شركة الكهرباء	1.644000	
2	نظام الحماية والتحكم الأساسي	0.000600	
3	قاطع دائرة كهربائية مَعدني مغلف بفولتية 11 كيلو فولت	0.001850	
		0.0	0.0
	فقدان مصدري الكهرباء بفولتية 11 كيلوفولت في ان واحد	0.312000	0.162240
المجموع إلى النقطة D		0.312000	0.162240
4	قضيب توزيع لوحة مفاتيح كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت - معزول	0.004100	0.153053
5	كيبل (11كيلوفولت) 350 متر، قناة تحت الأرض	0.002124	0.033347
6	نهايات الكابلات (8) عند 11 كيلو فولت	0.002960	0.002220
7	مفتاح فصل (مغلق)	0.001740	0.001740
8	محول	0.010800	1.430244
9	قاطع دائرة كهربائية معدني مغلف ذي فولتية 400 فولت	0.000210	0.001260
10	قضيب توزيع لوحة مفاتيح 400 فولت - مكشوف	0.009490	0.069182
11	قاطع دائرة كهربائية معدني مغلف ذي فولتية 400 فولت	0.000210	0.001260
12	قواطع دوائر معدنية مغلفة ذوات فولتية (فولت(5) (تعطلت أثناء الفتح)	0.000095	0.000378
13	كيبل (400 فولت)؛ 90 متر،داخل قناة فوق ٤.الأرض	0.000021	0.000168
	إجمالي القدرة عند نقطة الاستخدام 400 فولت	0.344490	1.855647

- الاستنتاجات: نظام التحويل الانتقائي الأساسي إلى مصدر الكهرباء 11 كيلوفولت

يؤدي استخدام نظام تحويل انتقائي أساسي إلى مصدر الكهرباء 11 كيلوفولت مع زمن تحويل يدوي مدته 9 دقائق إلى تقليل ساعات التوقف القسري السنوية عند نقطة استخدام 400 فولت بنسبة حوالي 50%، لكن معدل الفشل هو نفسه في نظام توزيع شعاعي بسيط.

الجدول 7.5. نظام انتقائي أولي لإمداد الطاقة الكهربائية بفولتية 11كيلوفولت: حساب تردد ومدة انقطاعات التيار الكهربائي عند نقطة الاستخدام (حمل 400 فولت) - مثال 2ب.

يمكن إتمام عملية التحويل التلقائي في أقل من 5 ثوانٍ بعد انقطاع مصدر الطاقة الرئيسي 1، بافتراض أن انقطاع التيار الكهربائي بجهد 480 فولت لمدة تقل عن 5 ثوانٍ لا يُعتبر انقطاعًا للتيار.

الجدول 11-7 مقارنة بين نظام توزيع شعاعي بسيط ونظام انتقائي أولي لفولتية 11 كيلو فولت إمداد الطاقة.

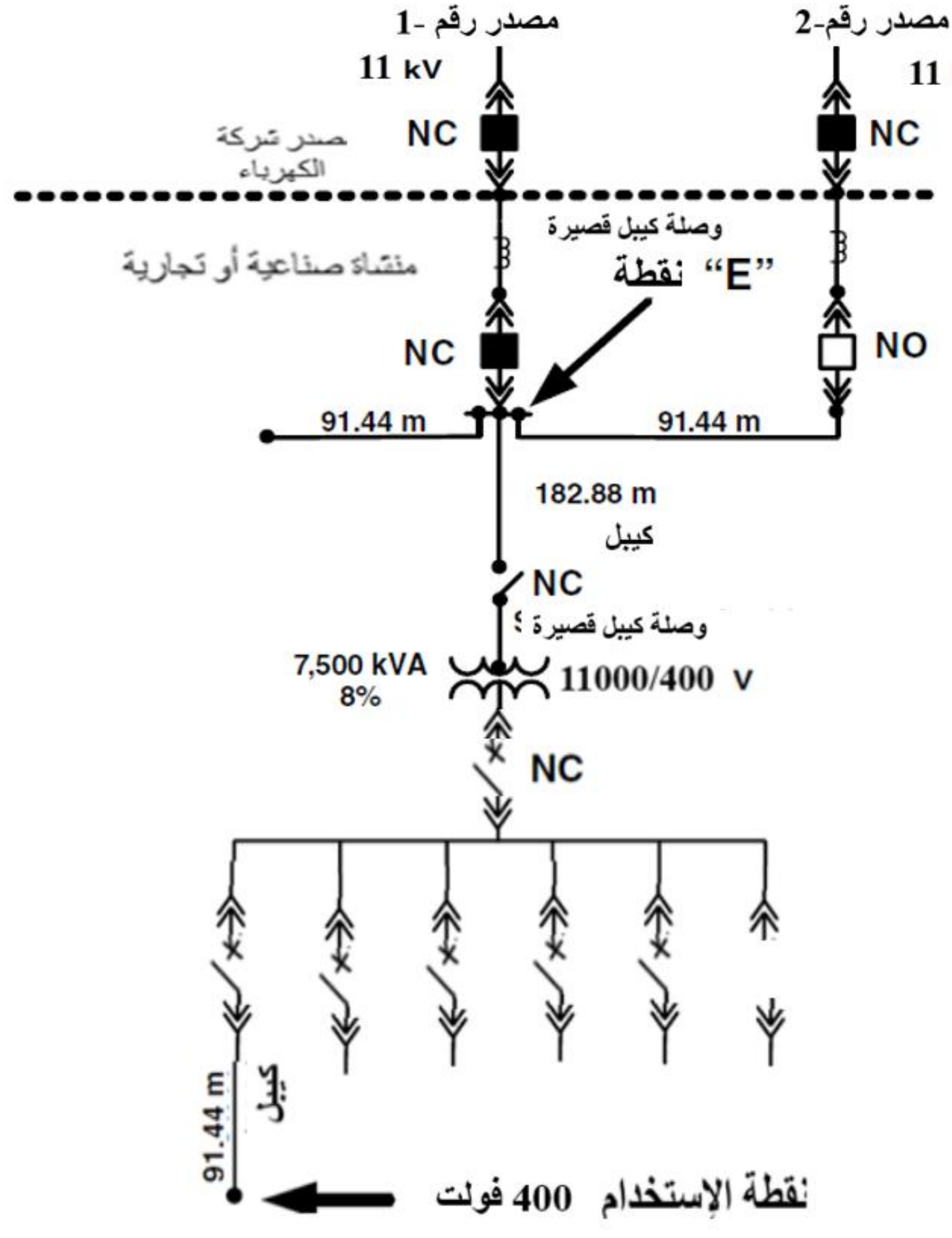
رقم المكون أو العنصر	المكون أو العنصر Component	(أعطال/سنة) λ (failures/year)	(ساعات التوقف القسري سنويًا) λr
	مثال 1 نظام توزيع شعاعي بسيط	1.990940	4.279332
	مثال 2أ نظام تحويل انتقائي أساسي إلى مصدر كهرباء رئيسي بفولتية 11 كيلوفولت (مع فترة تحويل مدتها 9 دقائق بعد انقطاع التيار الكهربائي)	1.990940	2.102614
	مثال 2ب نظام تحويل انتقائي أولي إلى مصدر كهرباء رئيسي بفولتية 11 كيلوفولت مع تحويل في أقل من 5 ثوانٍ بعد انقطاع التيار الكهربائي	0.344490	1.855647

إن استخدام معدات التحويل التلقائي التي تستطيع استشعار عطل في أحد مصادر الطاقة الرئيسية بفولتية 11 كيلوفولت والتحويل إلى المصدر الثاني في أقل من 5 ثوانٍ من شأنه أن يحقق تحسناً بنسبة 6 إلى 1 في معدل الأعطال عند نقطة استخدام 400 فولت (لا يُحتسب انقطاع التيار الكهربائي بجهد 400 فولت لمدة تقل عن 5 ثوانٍ كعطل).

3-7-11 مثال 3: نظام انتقائي أولي لجانب الحمل لقاطع دائرة كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت

وصف نظام انتقائي أولي لجانب الحمل لقاطع دائرة كهربائية 11كيلوفولت

يوضح الشكل 11-29 مخططًا أحادي الخط لنظام توزيع الطاقة لنظام انتقائي أولي للمحول. ما هو معدل الأعطال وعدد ساعات التوقف القسري سنويًا عند نقطة استخدام 400 فولت؟



الشكل 11-29 المثال 3: نظام انتقائي أساسي لجانب الحمل لقاطع دائرة كهربائية 11 كيلو فولت.

مثال 3أ - زمن تحويل التيار الكهربائي 9.0 دقائق.

مثال 3ب - زمن تحويل التيار الكهربائي 5 ثوانٍ .

(بافتراض أن زمن التحويل البالغ 5 ثوانٍ لن يؤدي إلى انقطاع الحمل عند نقطة 400 فولت للاستخدام.)

- النتائج: نظام انتقائي أساسي إلى جانب الحمل لقاطع الدائرة 11 كيلو فولت تُعرض نتائج حسابات الوثوقية والتوافر لزمن تحويل تيار كهربائي 9.0 دقائق في الجدول 11-8، ولزمن تحويل تيار كهربائي 5 ثوانٍ في الجدول11-9.

الجدول11-8. نظام انتقائي أساسي لجانب الحمل لقاطع دائرة كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت: حساب تردد ومدة انقطاعات التيار الكهربائي عند نقطة الاستخدام (حمل 400 فولت) بافتراض زمن تحويل يدوي مدته 9 دقائق إلى مصدر الكهرباء الرئيسي 2.

رقم المكون أو العنصر	المكون أو العنصر Component	(أعطال/سنة) λ (failures/year)	λr (ساعات التوقف القسري سنويًا)
1	مصدر كهرباء بفولتية 11 كيلوفولت من شركة الكهرباء	1.644000	
2	نظام الحماية والتحكم الأساسي	0.000600	
3	قاطع دائرة كهربائية معدني مغلف بفولتية 11 كيلو فولت	0.001850	
	إجمالي التيار المار عبر قاطع الدائرة الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت مع تحويل تلقائي بعد 9 ثوانٍ من عطل المصدر 1 والمصدر 2 يعمل بشكل سليم	1.646450	0.246968
	فقدان مصدري الكهرباء بفولتيه 11 كيلوفولت في آن واحد	0.312000	0.162240
4	قضيب توزيع لوحة مفاتيح كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت - معزول	0.004100	0.153053
E المجموع إلى النقطة		1.962550	0.562261
5	كيبل (11كيلوفولت)؛ 350 متر، قناة تحت الأرض	0.002832	0.044462
6	نهايات الكابلات عدد 10 عند 11 كيلو فولت	0.003700	0.002775
7	مفتاح فصل (مغلق)	0.001740	0.001740
8	محول	0.010800	1.430244
9	قاطع دائرة كهربائيه معدني مغلف ذي فولتية 400 فولت	0.000210	0.001260
10	قضيب توزيع لوحة مفاتيح 400 فولت - مكشوف	0.009490	0.069182
11	قاطع دائرة كهربائية معدنى مغلف ذى فولتية 400 فولت	0.000210	0.001260
12	قواطع دوائر معدنية مغلفة ذوات فولتية 400 فولت(5) (تعطلت أثناء الفتح)	0.000095	0.000378
13	كيبل (400 فولت)؛ 90 متر،داخل قناة فوق الأرض	0.000021	0.000168
14	نهايات كيبلات (2) عند 400 فولت	0.000740	0.000555
	إجمالي القدرة عند نقطة الاستخدام 400 فولت	1.992388	2.114285

- الاستنتاجات: نظام انتقائي أساسي لجانب الحمل

لقاطع دائرة كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت يقل وقت التوقف القسري السنوي عند نقطة استخدام 400 فولت في المثال 3 (نظام انتقائي أساسي لجانب الحمل لقاطع دائرة كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت) بنحو 10% عن المثال 2 نظام انتقائي أساسي لمصدر الطاقة الرئيسي بفولتية 11 كيلوفولت. ويبقى معدل الأعطال متقاربًا.

الجدول 11-9 نظام انتقائي أولي لجانب الحمل لقاطع الدائرة الكهربائية 11 كيلوفولت:حساب تردد ومدة انقطاعات التيار الكهربائي عند نقطة الاستخدام (حمل 400 فولت) بافتراض "تحويل تلقائي" لمدة 5 ثوانٍ إلى مصدر الكهرباء الرئيسي 2.

رقم المكون أو العنصر	المكون أو العنصر Component	(أعطال/سنة) λ (failures/year)	λr (ساعات التوقف القسري سنويًا)
1	مصدر كهرباء بفولتية 11 كيلوفولت من شركة الكهرباء		
2	نظام الحماية والتحكم الأساسي		
3	قاطع دائرة كهربائية معدني مغلف بفولتية 11 كيلو فولت		
	إجمالي التيار المار عبر قاطع الدائرة الكهربائية بفولتية 11 كيلوفولت مع تحويل تلقائي بعد 9 ثوانٍ من عطل المصدر 1 والمصدر 2 يعمل بشكل سليم	0.0	0.0
	فقدان مصدري الكهرباء بفولتية 11 كيلوفولت في آن واحد	0.312000	0.162240
4	قضيب توزيع لوحة مفاتيح كهربائية بفولتية 11 كيلوفولت - معزول	0.004100	0.153053
المجموع إلى النقطة D		0.316100	0.315293
5	كيبل (11كيلوفولت)؛ 350 متر ، قناة تحت الأرض	0.002832	0.044462
6	نهايات الكابلات عدد 10 عند 11 كيلو فولت	0.003700	0.002775
7	مفتاح فصل (مغلق)	0.001740	0.001740
8	محول	0.010800	1.430244
9	قاطع دائرة كهربائية معدني مغلف ذي فولتية 400 فولت	0.000210	0.001260
10	قضيب توزيع لوحة مفاتيح 400 فولت – مكشوف	0.009490	0.069182
11	قاطع دائرة كهربائية معدنى مغلف ذى فولتية 400 فولت	0.000210	0.001260
12	قواطع دوائر معدنية مغلفة ذوات فولتية 400 فولت(5) (تعطلت أثناء الفتح)	0.000095	0.000378
13	كيبل (400 فولت)؛ 90 متر،داخل قناة فوق الأرض	0.000021	0.000168
14	نهايات كيبلات (2) عند 400 فولت	0.000740	0.000555
	إجمالي القدرة عند نقطة الاستخدام فولت	0.345938	1.867318

الفصل 12

تقييم وثوقية منظومات الطاقة المتجددة

Renewable energy reliability evaluation

1-12 مقدمة

في السنوات الأخيرة، تزايد استخدام وحدات التوليد المعتمدة على الطاقة المتجددة - مثل توربينات الرياح، والألواح الكهروضوئية (PV)، ووحدات استغلال تيارات المد والجزر، وأنظمة تحويل طاقة الأمواج - لتغذية الأحمال المحلية في الشبكات المصغرة. وإلى جانب مزايا مثل الحد من انخفاض الجهد وتقليل فاقد الطاقة وتعزيز الوثوقية وتحسين ملف الجهد، تتيح الشبكات المصغرة استخدام موارد الطاقة المتجددة لتلبية احتياجات المستهلكين المحليين. ومع ذلك، ونظراً لطبيعة الموارد المتجددة المتباينة، فإن الطاقة التي تولدها هذه الوحدات تشهد تفاوتات زمنية كبيرة، مما يؤثر على جوانب مختلفة من الشبكات المصغرة تستوجب الدراسة والتحليل.

نظراً لأهمية وثوقية الشبكات المصغرة (microgrids)، فقد جرت العديد من الأبحاث في الموضوع لغرض تقييم وثوقية الشبكات المصغرة المرتبطة بالشبكة الكبرى وتأثيرها على مستوى النظام، ويهدف هذا الفصل إلى دراسة وثوقية المكونات المستخدمة في هذه الشبكات المصغرة.

بصورة عامة يُقصد بتقييم وثوقية شبكات الطاقة المتجددة التقييمُ المنهجي لقدرة نظام الطاقة المتجددة على مايأتي:

1. أداء وظيفته المحددة،
2. توليد الطاقة الكهربائية المطلوبة،
3. البقاء متاحاً للعمل عند توفر المصدر،
4. تحمّل أعطال المعدات والضغوط البيئية،
5. العودة إلى الخدمة خلال فترة زمنية مقبولة،
6. تلبية متطلبات الطلب الخاصة بالشبكة أو المستهلك،
7. تحقيق هذه الأهداف طوال عمره التشغيلي المخطط له.

وتتمثل إحدى العلاقات العامة المفيدة في التسلسل التالي:

مصدر طاقة متجدد ← معدات التوليد ← تحويل الطاقة ← شبكة التجميع ← محول/ محطة ثانوية ← الشبكة الكهربائية.

يمكن تقييم الوثوقية عند كل مستوى من هذه المستويات، ومن ثم على مستوى المحطة أو النظام ككل.

وتكتسب هذه المسألة أهمية خاصة بالنسبة لطاقتي الرياح والشمس؛ نظراً لوجود سببين مختلفين جوهرياً لعدم توليد الطاقة وهما :

- عدم توفر المورد: غياب الرياح أو الإشعاع الشمسي أو عدم كفايتهما.
- عدم التوفر الفني: حيث تكون المعدات قادرة على العمل من حيث المبدأ، ولكنها غير متاحة بسبب عطل أو أعمال صيانة أو انقطاع في الشبكة، وما إلى ذلك. ولا ينبغي التعامل مع هذه الأمور على أنها الشيء نفسه.

نظراً للتفاوت في مصادر الطاقات المتجددة ودرجات الحرارة، ستتم دراسة تأثير جميع العوامل المؤثرة بما في ذلك - الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح، ، ودرجة الحرارة - على معدل تعطل المكونات. ولتحقيق ذلك، يجب ايجاد وتطوير معادلات متنوعة تشمل: الفقد الحراري في أشباه الموصلات، وارتفاع درجة حرارة المحولات والكيبلات، ومعامل درجة الحرارة للفولتية والقدرة في الألواح الكهروضوئية ومعامل تعديل درجة الحرارة للفولاذ السبائكي، ومقاومة الكلل (الإجهاد الدوري)، ومعادلات إجهادات الانحناء والتلامس للأجزاء الميكانيكية، ودالة حالة الحد للتوربين. وقبل الشروع في البت في هذه الأمور لابد من التذكير أولاً في العلاقات الأساسية للوثوقية التي سيتم الإستفادة منها في الفقرات التالية عى مدار الفصل.

2-12 الوثوقية، و التوفرية (الجاهزية)، والقابلية للصيانة

Reliability, availability and maintainability

ترتبط هذه المصطلحات الثلاثة ببعضها ارتباطاً وثيقاً، ولكن ينبغي عدم الخلط بينها.

- **الوثوقية Reliability**

الوثوقية هي قدرة عنصر أو نظام ما على أداء وظيفته المطلوبة لفترة زمنية محددة وفي ظل ظروف محددة. بالنسبة لنموذج بسيط ذي معدل فشل ثابت تعطى الوثوقية عموماً بالمعادلة البسيطة الآتية :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \qquad (12.1)$$

حيث:

- R(t)= الوثوقية عند الزمن المحدد
- λ= معدل الفشل

- t= زمن التشغيل

على سبيل المثال، إذا كان لأحد المكونات معدل فشل ثابت قدره 0.02 فشل / سنة عندئذ تكون الوثوقية لهذا المكون :

$$R(1) = e^{-0.02} = 0.9802 \qquad (12.2)$$

أي أن احتمال استمرار المكون في العمل لمدة عام واحد دون حدوث فشل يبلغ حوالي 98.0% وفقاً لهذا النموذج المبسّط.

- **التوافرية Availability**

تأخذ التوافرية A في الاعتبار كلاً من حالات الفشل وعمليات الاستعادة. بالنسبة لمكوّن قابل للإصلاح يخضع لنموذج بسيط ذي حالتين، يكون امكون متوفر:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \qquad (12.3)$$

حيث:

MTBF = متوسط الزمن بين حالات الفشل (Mean Time Between Failures)

MTTR = متوسط الزمن اللازم للإصلاح/ الاستعادة (Mean Time To Repair/Restore)

على سبيل المثال:

MTBF = 1,000 ساعة

MTTR = 20 ساعة

$$A = \frac{1000}{1000 + 20} = 98.04\%$$

يوضح هذا نقطة هامة: يمكن أن يتعرض النظام لحالات فشل متكررة نسبياً، ومع ذلك يحافظ على مستوى عالٍ من التوافرية إذا أمكن استعادته للعمل بسرعة.

- **القابلية للصيانة Maintainability**

تُشير القابلية للصيانة إلى مدى سهولة وسرعة إعادة النظام إلى العمل بعد حدوث عطل.

وتعتمد هذه القابلية على:

- تشخيص الأعطال
- سهولة الوصول
- قطع الغيار
- الكوادر البشرية

- الرافعات
- السفن
- الظروف الجوية
- وسائل النقل
- إجراءات الإصلاح
- الأدوات
- المراقبة عن بُعد
- استراتيجية الاستبدال.

يكتسب هذا الأمر أهمية خاصة بالنسبة لمحطات الطاقة الشمسية البعيدة ومحطات طاقة الرياح البحرية. ويُراعي إطار إدارة الوثوقية التابع للجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) بشكل صريح العلاقات بين الوثوقية والتوافرية وسهولة الصيانة والدعم.

3-12 لماذا تختلف وثوقية الطاقة المتجددة

Why renewable-energy reliability is different

تتميز المولدات التقليدية عموماً بإمكانية التحكم فيها؛ فإذا توفرت المعدات والوقود، يمكن تشغيلها وتوجيهها لتوليد الطاقة. أما توليد الطاقة المتجددة فيتضمن متغيراً عشوائياً إضافياً:

القدرة المنتجة تكون دالة : امصدر ، حالة المعدات ، حالة الشبكة

$$\text{Power output} = f(\text{resource, equipment state, grid state})$$

بالنسبة للطاقة الشمسية تعتمد القدرة المنتجة على حالة الخلاية الضوئية PV :

$$P_{PV} = f(G, T, \text{PV حالة المعدات}) \qquad (12.4)$$

حيث:

- G = الإشعاع الشمسي
- T= درجة الحرارة.

بالنسبة لطاقة الرياح تعتمد القدرة نالمنتجة على سرعة الريح وحالة التوربين :

$$P_{wind} = f(v, \text{حالة التوربين}) \qquad (12.5)$$

حيث v = سرعة الرياح.

لذا، ينبغي أن تميز دراسة الوثوقية بين:

أ. **توفر الموارد** ، مثال: عدم كفاية ضوء الشمس ليلاً. لا يُعد هذا عطلاً في معدات الطاقة الكهروضوئية.

. **توفر المعدات** ، مثال: تعطل العاكس (Inverter) رغم كفاية الإشعاع الشمسي. تُصنف هذه الحالة على أنها عدم توفر فني.

ج. **توفر الشبكة** ، مثال: محطة الطاقة الكهروضوئية قادرة على التوليد، ولكن الاتصال بالشبكة غير متاح. تُصنف هذه الحالة على أنها انقطاع أو تقييد للإنتاج مرتبط بالشبكة.

4-12 التسلسل الهرمي لدراسة الوثوقية

عادةً ما تبدأ دراسة وثوقية الطاقة المتجددة الجيدة من مستوى المكونات وتتدرج صعوداً.

1-4-12 محطة طاقة شمسية كهروضوئية

يكون التسلسل الهرمي النموذجي لمحطة طاقة شمسية كهروضوئية كما يلي:

├── الألواح الكهروضوئية

├── كابلات التيار المستمر (DC)

├── صناديق تجميع السلاسل (String Combiner Boxes)

├── أنظمة حماية التيار المستمر

├── العواكس (Inverters)

├── محولات التيار المتناوب (AC)

├── معدات التبديل للفولتية المتوسطة (MV Switchgear)

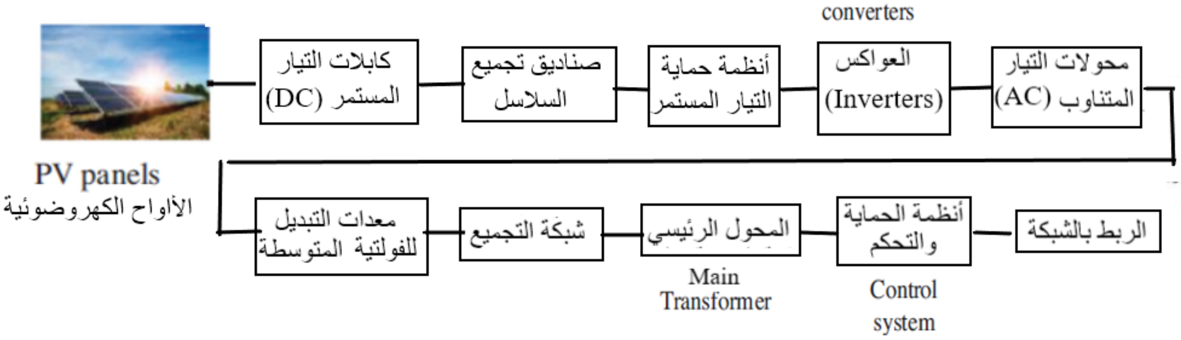
├── شبكة التجميع

├── المحول الرئيسي

├── أنظمة الحماية والتحكم

└── الربط بالشبكة

يبين الشكل 12-1مخطط كتلي لتسلسل المعدات لمحطة طاقة شمسية كهروضوئية .



الشكل 12-1 المعدات للمحطة طاقة شمسية كهروضوئية.

o وثوقية أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية Solar PV reliability

بالنسبة لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية، يُجب مراعاة العوامل المؤثرة على تقييم الوثوقية التي تتضمن ما يلي:

- على مستوى الوحدة: تدهور الخلايا، البقع الساخنة، انفصال الطبقات، كسر الزجاج، عطل صندوق التوصيل، عطل صمام التجاوز، التدهور والاستجابة التناسبية التكاملية التفاضلية (PID)، مشاكل الموصلات.
- مكونات النظام الأخرى: العاكس، كابلات التيار المستمر، الموصلات، صناديق التجميع، المحولات، مفاتيح التبديل، الحماية، نظام التحكم الإشرافي وجمع البيانات (SCADA)، الاتصالات.

في العديد من محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية الكبيرة، قد يكون للعواكس ومكونات النظام الأخرى تأثير كبير على توافر الطاقة، على الرغم من وجود أعداد كبيرة جدًا من وحدات الطاقة الشمسية الكهروضوئية نفسها.

o وثوقية تخزين الطاقة بالبطاريات Battery energy storage reliability

إذا كانت محطة الطاقة المتجددة تتضمن نظام تخزين الطاقة بالبطاريات، فيجب إضافة طبقة وثوقية أخرى:

نظام تخزين الطاقة بالبطاريات

├── خلايا البطارية

├── الوحدات

├── الحوامل

├── نظام إدارة البطارية

├── نظام تحويل الطاقة/العاكس

├── نظام التكييف والتهوية

├── نظام الحماية من الحرائق

├── نظام الحماية من التيار المستمر

├── لوحة توزيع التيار المتردد

└── المحول

يجب تقييم ما يلي: عطل الخلية/الوحدة، الإدارة الحرارية، عطل نظام إدارة البطارية، عطل نظام تحويل الطاقة، التدهور، السعة القابلة للاستخدام، انقطاع التيار القسري، إيقاف التشغيل لأسباب السلامة، انقطاع الطاقة الاحتياطية.

بالنسبة لمحطات الطاقة المتجددة الهجينة، تُعد وثوقية نظام تخزين الطاقة بالبطاريات بالغة الأهمية، لأن التخزين قد يكون مسؤولاً عن استقرار إنتاج الطاقة المتجددة.

2-4-12 محطة طاقة الرياح

بالنسبة لتوربينات الرياح من النوع الأفقي المبينة في الشكل 12-2 وهي الأكثر استخداماً يكون تركيبها الهيكلي كما يأتي :

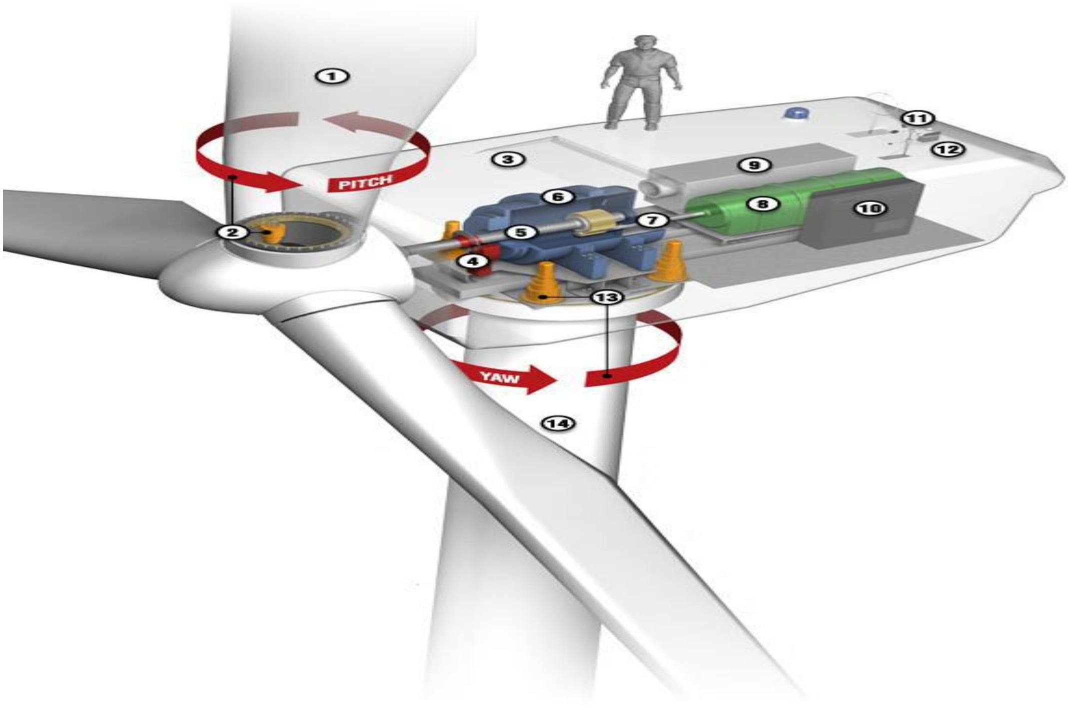
1- الدوّار (Rotor): يتكون الدوّار من شفرات مثبتة على محور مركزي؛ وتتميز هذه الشفرات بشكل يشبه أجنحة الطائرات، حيث تعتمد على مبادئ قوة الرفع الديناميكية الهوائية لتحويل طاقة الرياح إلى طاقة ميكانيكية.

2- آلية التحكم في زاوية الميل (Pitch drive): يمكن تدوير الشفرات لتقليل مقدار قوة الرفع عندما تصبح سرعة الرياح عالية جداً.

3- حجرة التوربين (Nacelle): يتصل الدوّار بحجرة التوربين التي تعلو البرج وتضم بداخلها المكونات المختلفة.

4- المكبح (الفرامل): يعمل المكبح الميكانيكي كنظام احتياطي لآلية الكبح التي توفرها أنظمة التحكم في زاوية ميل الشفرات (pitch drives)، أو كمكبح تثبيت أثناء عمليات الصيانة.

5- عمود الدوران منخفض السرعة: يتصل بالعضو الدوار (الروتور).



الشكل 12-2 مكونات توربين الرياح الأفقي.

6- صندوق التروس (ناقل الحركة): يقوم العضو الدوار بتدوير العمود منخفض السرعة بسرعات تتراوح بين 20 دورة في الدقيقة في التوربينات الكبيرة و400 دورة في الدقيقة في الوحدات السكنية. وتعمل تروس نقل الحركة على زيادة السرعة لتصل إلى النطاق المطلوب لتشغيل معظم المولدات الكهربائية، وهو ما بين 1200 و1800 دورة في الدقيقة. وتستخدم بعض التوربينات الصغيرة الحجم نظام إدارة مباشر (direct-drive)، مما يلغي الحاجة إلى صندوق التروس.

7- عمود الدوران عالي السرعة: يتصل بالمولد.

8- المولد: يحوّل الطاقة الميكانيكية التي ينتجها الدوار إلى كهرباء؛ وتنتج التصاميم المختلفة إما تياراً مستمراً (DC) أو تياراً متردداً (AC). ويمكن استخدام هذه الكهرباء لتشغيل أجهزة قريبة، أو تخزينها في بطاريات، أو نقلها إلى شبكة الكهرباء.

9- وحدة التحكم: نظام حاسوبي يقوم بإجراء اختبارات التشخيص الذاتي، وتشغيل التوربين وإيقافه، وإجراء التعديلات اللازمة مع تغير سرعات الرياح. كما يمكن للمشغّل -عن بُعد- إجراء فحوصات للنظام وإدخال معايير تشغيل جديدة عبر المودم.

10- مقياس سرعة الرياح (Anemometer): يقيس سرعة الرياح ويرسل القراءة إلى وحدة التحكم.

11- ريشة توجيه الرياح (Wind vane): تحدد اتجاه الرياح وترسل المعلومة إلى وحدة التحكم التي تقوم بضبط زاوية الانعطاف (Yaw).

12- آلية توجيه الانعطاف (Yaw drive): تحافظ على توجيه الدوار نحو مهب الريح.

13- البرج (Tower): نظراً لأن سرعة الرياح تزداد مع الارتفاع، فإن الأبراج الأكثر ارتفاعاً تتيح للتوربينات التقاط المزيد من الطاقة.

14- المكونات الكهربائية: للتحكم والربط بالشبكة الكهربائية.

لذا يكون التسلسل الهرمي النموذجي لمحطة طاقة الرياح كما يلي:

├── الدوار/الشفرات

├── نظام ضبط زاوية الميل (Pitch system)

├── نظام التوجيه (Yaw system)

├── المحمل الرئيسي

├── صندوق التروس (ناقل الحركة)

├── المولد

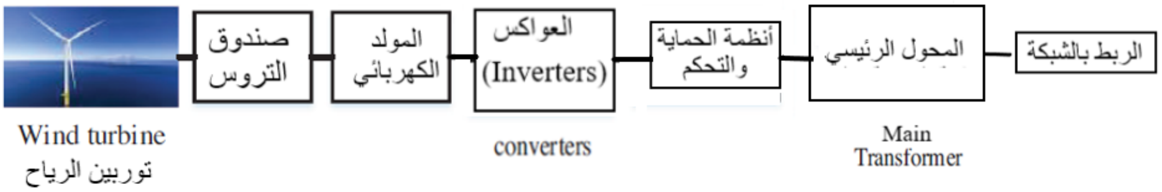
├── المبدل الإلكتروني (Converter)

├── المحوّل الكهربائي (Transformer)

├── نظام التحكم

├── معدات التبديل والحماية (Switchgear)
├── نظام تجميع الطاقة
└── المحطة الثانوية / الربط بالشبكة

وتتحدد وثوقية المحطة بناءً على التفاعلات بين هذه العناصر. ويبين الشكل 12-3 تسلسل المعدات لمحطة توليد الطاقة من طاقة الرياح بصورة مختصرة.



الشكل 12-3 المكونات الأساسية لوحدة نموذجية لتوليد القدرة الكهربائية من طاقة الرياح.

وتؤثر التقنية المستخدمة في المولدات في وحدات طاقة الرياح على أداء الوثوقية لهذه الوحدات. ولإجراء دراسة شاملة لهذه الوحدات، يتم النظر في تقنيتين شائعتين: المولد المتزامن ذو المغناطيس الدائم (PMSG) Permanent Magnet Synchronous Generator والمولد الحثي مزدوج التغذية Double fed induction generator (DFIG).

5-12 وثوقية توربينات الرياح Wind turbine reliability

فيما يتعلق بطاقة الرياح، ينبغي عادةً تقييم ما يلي على الأقل:

- المكونات الرئيسية: الشفرات، نظام تغيير زاوية الميل (Pitch system)، نظام التوجيه (Yaw system)، المحمل الرئيسي، صندوق التروس (ناقل الحركة)، المولد، المبدّل (Converter)، المكبح، الأنظمة الهيدروليكية، نظام التحكم، المحوّل الكهربائي (Transformer)، معدات التبديل (Switchgear)، الكيبلات.

التبعات المعتادة للأعطال

المكون - العواقب المحتملة

شفرات التوربين: إيقاف تشغيل التوربين / انخفاض الطاقة

علبة التروس: انقطاع طويل الأمد

المولد: التوربين غير متاح

المحول: التوربين غير متاح / تم تخفيض طاقته

المحول الكهربائي: التوربين / اتصال الشبكة غير متاح

الكابل: احتمال تأثر عدة توربينات

نظام التحكم: إيقاف تشغيل التوربين

نظام تغيير زاوية ميل الشفرات: إيقاف تشغيل آمن

نظام تغيير اتجاه الشفرات: انخفاض / توقف الإنتاج

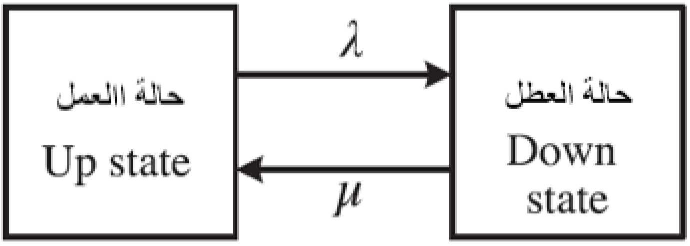
تتسم موثوقية أنظمة طاقة الرياح بحساسية خاصة تجاه الظروف البيئية وظروف التحميل.

لقد طُوِّرت مجموعة معايير IEC 61400 خصيصاً لأنظمة طاقة الرياح؛ فعلى سبيل المثال، يحدد المعيار IEC TS 61400-4-1:2026 منهجيةً لتقييم موثوقية التصميم لمكونات مجموعة نقل الحركة (أو صندوق التروس) في توربينات الرياح، وذلك فيما يتعلق بآليات الفشل التي يمكن نمذجتها رياضياً.

6-12 معدل الفشل لوحدات التوليد القائمة على الطاقة المتجددة

في هذه الفقرة ، سيتم اشتقاق معدل الفشل لوحدات توليد القدرة من الطاقة الكهروضوئية ، وأنظمة توليد القدرة من طاقة الريح ، وذلك استناداً إلى معدلات فشل المكونات المكوِّنة لها، مع الأخذ في الاعتبار تأثير التغيرات في موارد الطاقة المتجددة ـــ بما في ذلك سرعة الرياح، والإشعاع الشمسي ـــ بالإضافة إلى تأثير التغير في درجات الحرارة. ويُستخدم لكل مكون نموذج "ماركوف" (Markov model) ثنائي الحالة، يشتمل على حالتي التشغيل (up state) والتوقف (down state)، كما هو موضح في الشكل 4-12 على النحو التالي:

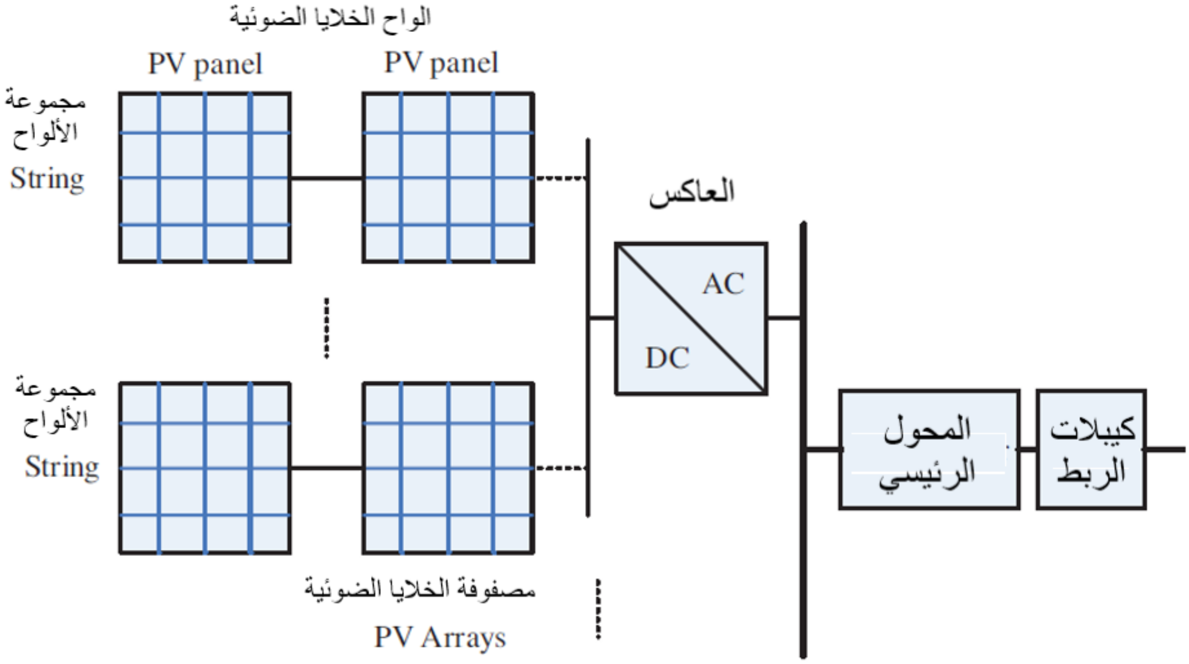
$$P_{up} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad P_{down} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \qquad (12.6)$$



الشكل 12-4 نموذج ماركوف ثنائي الحالة لمكونات النظام.

12-6-1 معدل الفشل في النظام الكهروضوئي

يُعرض هيكل النظام الكهروضوئي النموذجي في الشكل12-5 .



الشكل 12-5 هيكل نظام الطاقة الكهروضوئية النموذجي.

كما يظهر في الشكل12-5 ، تتكون اللوحة الكهروضوئية من عدة أفرع تحتوي على خلايا شمسية موصلة على التوالي. ويمكن توصيل نظام كهروضوئي مكون من عدة مصفوفات كهروضوئية بالشبكة عبر عاكس (inverter) ومحول (transformer) وكيبلات ربط . وبالإضافة إلى العاكس، ويمكن استخدام محول تيار مستمر إلى تيار مستمر (DC-DC converter) في هيكل النظام الكهروضوئي لتتبع نقطة القدرة القصوى Maximum power point tracking(MPPT) ، ومع ذلك، ففي الأنظمة الكهروضوئية الحديثة، يمكن للعاكسات -إلى جانب تحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب - أن تؤدي وظيفة محول تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT)، وبالتالي يمكن الاستغناء عن محول التيار المستمر إلى تيار مستمر المرتبط بها. وهنا ، يُفترض أن العاكس المستخدم في النظام الكهروضوئي يمكنه أداء كلتا الوظيفتين: تتبع نقطة القدرة القصوى وتحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب . مع ذلك، إذا وُجد محول MPPT بالإضافة إلى العاكس، فيمكن تحديد معدل فشله بسهولة.

تتكون محولات التيار المستمر إلى تيار مستمر من صمام ثنائي (دايود) واحد أو أكثر، ومتسعات، وترانزستورات ثنائية القطب ذات بوابة معزولة (IGBTs). والمعادلات المتعلقة بتحديد معدلات فشل هذه

الأجهزة ومدى اعتمادها على التيار المار عبرها. وفي هذا الهيكل، تتكون المصفوفة الكهروضوئية من عدة سلاسل متوازية تحتوي على ألواح موصلة على التوالي.

في حال تعطل المحوّل أو الكيبل، فمن المرجح أن يتعطل النظام بأكمله، مما يؤدي إلى انقطاع الطاقة المنقولة إلى الشبكة . وعلاوة على ذلك، فإن تعطل أي مصفوفة ضمن النظام الكهروضوئي يؤدي أيضاً إلى تعطل ذلك الجزء من مصدر الإنتاج الذي يضم المصفوفة المعطّلة. ولذلك، يمكن تحديد القدرة الإنتاجية للنظام الكهروضوئي باستخدام المعادلة التالية :

$$P_{PV} = \frac{n-1}{n} P_{string} = \frac{n-1}{n} m P_{panel}, \qquad (12.7)$$

حيث تمثل كل من P_{PV} و n وP_{string} و m وP_{panel} على التوالي: القدرة المولدة بواسطة النظام الكهروضوئي، وعدد السلاسل المركبة في النظام، والقدرة المولدة من كل سلسلة، وعدد الألواح الموصلة على التوالي في كل سلسلة، والقدرة المولدة من كل لوح. ويؤدي تعطل أي عاكس (inverter) إلى انعدام القدرة المولدة من المصفوفة المرتبطة به؛ فإذا كان النظام الكهروضوئي يتكون من n_a من المصفوفات، فإن تعطل أي مصفوفة يؤدي إلى انخفاض القدرة المولدة للنظام الكهروضوئي لتصبح:

$$P_{PV} = \frac{n_a-1}{n_a} P_{array}, \qquad (12.8)$$

حيث تمثل P_{PV} وn_a وP_{array} على التوالي الطاقة المولدة من النظام الكهروضوئي وعدد المصفوفات المثبتة في النظام الكهروضوئي والطاقة المولدة من كل مصفوفة. يمكن تحديد الطاقة المولدة من الألواح الكهروضوئية مع مراعاة تغير الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة على النحو التالي:

$$P_{panel} = \frac{s}{s_0} P_0 [1 + \gamma_P (T_a - T_{a0})], \qquad (12.9)$$

حيث تمثل s و s_0 و P_0 و γ_P و T_a و T_{a0} الإشعاع الشمسي، والإشعاع الشمسي في ظروف الاختبار، والطاقة المولدة من اللوحة الكهروضوئية في ظروف الاختبار، ومعامل درجة حرارة الطاقة ودرجة الحرارة المحيطة في ظروف الاختبار. بالإضافة إلى الطاقة المولدة، يعتمد جهد اللوحة الكهروضوئية على درجة الحرارة كما يلي:

$$V_{panel} = V_0 [1 + \gamma_V (T_a - T_{a0})], \qquad (12.10)$$

حيث V_0 و γ_v هما جهد نقطة القدرة القصوى للوحة الكهروضوئية في ظل ظروف الاختبار القياسية ومعامل درجة الحرارة لمعامل الجهد، على التوالي. تتكون الألواح الكهروضوئية من خلايا شمسية ذات وصلات p-n. وبالتالي، يتم تحديد معدل فشل هذه المكونات بطريقة مشابهة لأجهزة أشباه الموصلات الأخرى كما

$$\lambda_{sc} = \lambda_0 \pi_T \pi_S \pi_A \pi_R \pi_E, \qquad (12.11)$$

حيث تمثل λ_{sc} و λ_0 و π_T و π_S و π_A و π_R و π_E معدل فشل الخلية الشمسية، ومعدل الفشل الأساسي للخلية الشمسية، ومعامل درجة الحرارة، ومعامل الإجهاد الكهربائي، ومعامل التطبيق، ومعامل القدرة، والمعامل البيئي. ولتحديد معدل فشل لوحة الخلايا الكهروضوئية مع مراعاة تغير درجة الحرارة والطاقة المولدة، يمكن تحديد معامل درجة الحرارة، ومعامل الإجهاد الكهربائي، ومعامل القدرة على النحو التالي:

$$\begin{aligned} \pi_T &= e^{\frac{-E_a}{k}\left(\frac{1}{T+273}-\frac{1}{298}\right)}, \\ \pi_s &= \alpha e^{\beta V_{SC}}, \\ \pi_R &= P_{sc}^{a}, \end{aligned} \qquad (12.12)$$

حيث تمثل α وβ وa ثوابت خاصة بالخلية الشمسية المحددة، بينما يمثل كل من V_{sc} وP_{sc} الفولتية والقدرة المولدة للخلية الشمسية. ويُعتبر معامل التطبيق للخلية الشمسية في النظام الكهروضوئي مساوياً لـ 1.5، في حين يُعتبر المعامل البيئي المرتبط بالمنطقة الساحلية مساوياً لـ 15. ويُعد الغبار أحد العوامل المهمة التي لها تأثير كبير على أعطال الألواح الشمسية؛ فكلما زادت كمية الغبار المتراكمة على الألواح الكهروضوئية، ارتفع معدل تعطلها. ولهذا الغرض، ونظراً للظروف البيئية، تخضع الألواح الكهروضوئية لعمليات تنظيف دورية. في هذا المضمار ، أُدرج هنا عامل الغبار ضمن عامل الظروف البيئية، بحيث تزداد قيمة هذا العامل بزيادة كمية الغبار. واستناداً إلى المعادلات (12.7) إلى (12.12)، يمكن تحديد معدل تعطل اللوح الكهروضوئي مع الأخذ في الاعتبار التغيرات في الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة. كما يمكن حساب معدلات تعطل العاكس (Inverter) والمحول والكيبلات بطريقة مماثلة للإجراءات المتبعة مع توربينات الرياح ؛ وبناءً على مقدار الفولتية والقدرة المولدة للمصفوفة الكهروضوئية، يتم حساب التيار والفولتية لكل من العاكس والمحول والكيبلات، واستخدام هذه القيم لتحديد معدل تعطل النظام الكهروضوئي.

معدل فشل نظام التحكم المركزي

في نظام التحكم المركزي للشبكة الصغيرة القائمة على الطاقة المتجددة، قد تحدث أعطال في كل من الأجهزة والبرامج. تشمل الأجهزة عددًا من أجهزة الاستشعار ومعالجات الإشارات ووحدات التحكم

المختلفة، بينما تشير البرامج إلى برامج التحكم. عندما يفشل أي من البرامج أو الأجهزة، يفشل نظام التحكم المركزي. وبالتالي، يمكن تحديد معدل فشل نظام التحكم المركزي على النحو التالي:

$$\lambda_{cc} = \lambda_h + \lambda_s, \qquad (12.13)$$

حيث تمثل الرموز λ_{cc} وλ_h وλ_s معدلات الفشل لكل من نظام التحكم، والمكونات المادية (الأجهزة)، والبرمجيات، على التوالي. ونظراً للنضج التقني لأنظمة التحكم المركزية المستخدمة في الشبكات الصغيرة القائمة على الطاقة المتجددة، غالباً ما يتم استبعادها عند حساب معدلات فشل البرمجيات. ويؤدي فشل نظام التحكم المركزي إلى تشغيل غير سليم للشبكة الصغيرة محل الدراسة، مما يترتب عليه فشل الشبكة بأكملها. ومن ثم، ومن منظور الوثوقية، تُعتبر الوحدات القائمة على الطاقة المتجددة ونظام التحكم المركزي متصلة على التوالي في نموذج الوثوقية الخاص بالشبكة الصغيرة؛ ولذلك، ولحساب معدل الفشل المكافئ للشبكة الصغيرة، يتم جمع معدل فشل الوحدات القائمة على الطاقة المتجددة مع معدل فشل وحدة التحكم المركزية.

2-6-12 معدل فشل توربينات الرياح

في هذا الجزء، يتم تحديد معدل الفشل المكافئ لتوربينات الرياح القائمة على تقنية مولد المغناطيس الدائم المتزامن (PMSG). كما هو موضح في الشكل 12-2، فإن فشل المكونات الرئيسية لوحدة توليد طاقة الرياح، والتي تشمل علبة التروس، ومولد المغناطيس الدائم المتزامن، والمحولات الكهربائية، ونظام التحكم، والمحول الكهربائي، والكيبلات، يؤدي إلى توقف نقل الطاقة المنتجة من توربينات الرياح إلى الشبكة الصغيرة، وتصبح الطاقة الناتجة صفرًا. وبالتالي، وفقًا لمفهوم الوثوقية، وبما أن جميع هذه المعدات موصولة على التوالي في النظام، يمكن حساب معدل الفشل المكافئ لوحدة توليد طاقة الرياح ومعدل الإصلاح على النحو التالي:

$$\lambda_t = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k, \qquad (12.14)$$
$$\mu_t = \frac{\lambda_t}{\sum_{k=1}^{n} \frac{\lambda_k}{\mu_k}},$$

حيث يمثل λ_t وμ_t، على التوالي، معدل الفشل المكافئ ومعدل الإصلاح لتوربينات الرياح المكونة من n من المكونات المتسلسلة في نموذج الوثوقية. كذلك يمثل كل من λ_k وμ_k معدل الفشل ومعدل الإصلاح للعناصر الرئيسية لهيكل توربينات الرياح، على التوالي. وتمت دراسة مفاهيم وثوقية علبة التروس المستخدمة في بعض أنواع توربينات الرياح، بما في ذلك التروس المستقيمة والحلزونية والأسطوانية مع مراعاة تأثير التنقر وكسر جذر السن والانحناء وإجهاد التلامس والتآكل الاحتكاكي والتشوه اللدن. ويمكن حساب إجهادات الانحناء المسموح بها وإجهادات التلامس لعلبة التروس على النحو التالي:

$$\sigma_F = \frac{\sigma_{F\lim} Y_N}{S_F Y_\theta Y_Z}, \qquad (12.15)$$
$$\sigma_H = \frac{\sigma_{F\lim} Z_N Z_W}{S_H Y_\theta Y_Z},$$

حيث تمثل الرموز σ_F و σ_H و σ_{Flim} و σ_{Hlim} و Y_N و S_F و Y_Z و Z_N و Z_W و S_H و Y_θ ما يلي: إجهاد الانحناء المسموح به، وإجهاد التلامس المسموح به، وحد الكلال لإجهاد الانحناء، وحد الكلال لإجهاد التلامس، ومعامل دورة الإجهاد لمقاومة الانحناء، ومعامل الأمان لإجهاد الانحناء، ومعامل الوثوقية، ومعامل دورة الإجهاد لمقاومة التنقير، ومعامل نسبة الصلادة لمقاومة التنقير، ومعامل الأمان ضد التنقير، ومعامل درجة الحرارة. والعلاقة بين احتمالية تعطل صندوق التروس وسرعة الدوران هي علاقة خطية. وتعتمد سرعة دوران كل من التوربين والمولد وصندوق التروس على سرعة الرياح.

$$n = \frac{60\omega}{2\pi} = \frac{60v}{2\pi r}, \qquad (12.16)$$

حيث n هي سرعة الدوران بوحدة دورة في الدقيقة (rpm)، و ω هي السرعة الزاوية بوحدة رادين/ ثانية (rad/s)، و v هي سرعة الرياح، و r هو نصف قطر جهاز الدوران. وفي توربين الرياح، لا تتجاوز درجة حرارة المكونات المركّبة 100 درجة مئوية. كما يمكن تحديد عامل تعديل درجة الحرارة المرتبط بالفولاذ (الحديد الصلب) الكربوني والسبائكي المستخدم على نطاق واسع في صناعة التروس على النحو التالي:

$$k_d = 0.975 + 0.000432T_F - 0.115 \times 10^{-5} T_F^2 + 0.104 \times 10^{-8} T_F^3 - 0.595 \times 10^{-12} T_F^4, \qquad (12.17)$$

حيث T_F هي درجة حرارة الجهاز بمقياس فهرنهايت، وتتراوح بين 70 و1000 درجة فهرنهايت. وبالتالي، يمكن تحديد عطل مكونات علبة التروس على النحو التالي :

$$\lambda_{gearbox}(T_F) = \frac{k_d(T_F)}{k_d(T_{F0})} \lambda_{gearbox}(T_{F0}). \qquad (12.18)$$

7-12 بيانات الأعطال - - أساس الدراسة

Failure data — the foundation of the study

لا يكون نموذج الوثوقية فعالاً إلا بقدر جودة بيانات الأعطال المُستخدمة فيه. وتشمل بيانات الإدخال النموذجية كمثال على المعلمة ما يلي :

- معدل الأعطال (أعطال/ سنة)
- متوسط الوقت بين الأعطال (ساعات)
- متوسط وقت الإصلاح (ساعات)
- احتمالية الإصلاح (٪)
- ساعات الصيانة المخططة (سنة)
- ساعات الانقطاع القسري (سنة)
- نمط العطل (العاكس، المحول، الكابل، إلخ)
- نتيجة العطل (فقدان كامل/جزئي للطاقة)
- توافر قطع الغيار (نعم/لا)
- ساعات استجابة فريق الإصلاح
- ساعات/أيام القيود الجوية
- العمر الافتراضي للمكون (سنوات)

بالنسبة لأنظمة الطاقة المتجددة، يُفضل استخدام ما يلي:

1. بيانات الشركة المصنعة،
2. البيانات التاريخية الخاصة بالمشروع،
3. بيانات تشغيل الأسطول،
4. قواعد بيانات الصناعة،
5. دراسات الموثوقية المنشورة،
6. التقدير الهندسي في حال عدم توفر البيانات

8-12 تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها (FMEA)

Failure Mode and Effects Analysis — FMEA

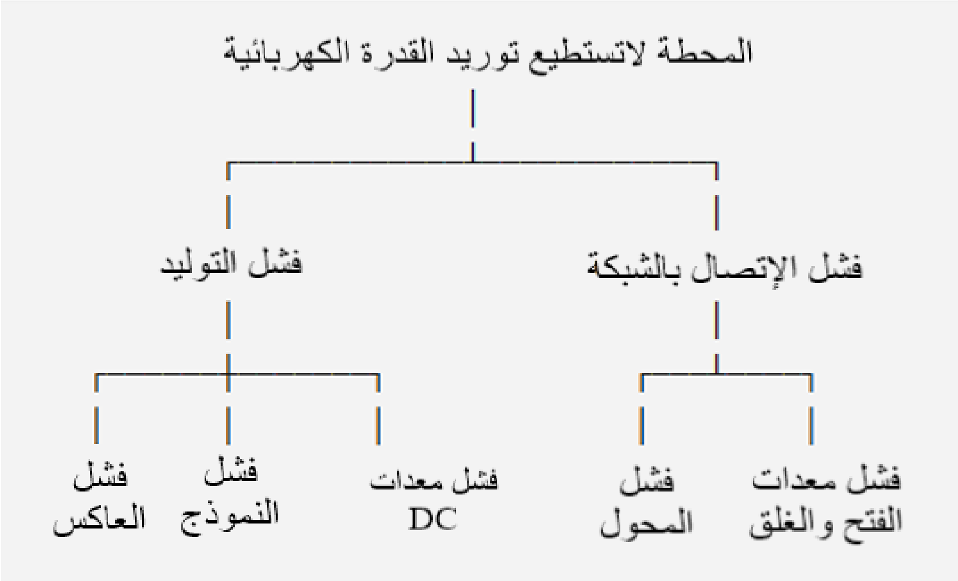
يُعدّ تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها (FMEA) من أوائل التقنيات التفصيلية. لكل مُكوّن، حدّد ما يلي: نمط الفشل، سبب الفشل، تأثير الفشل، طريقة الكشف، النتيجة، الشدة، التكرار، إمكانية الكشف، الإجراء التصحيحي. فمثال على عاكس الطاقة الشمسية الكهروضوئية:

مثال على العنصر المُكوّن: عاكس الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، نمط الفشل: عطل كامل في العاكس
السبب: عطل في نظام التبريد ، التأثير المحلي: توقف العاكس
التأثير على المحطة: عدم قدرة سلاسل الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصلة على تصدير الطاقة
الكشف: إنذار نظام التحكم الإشرافي وجمع البيانات (SCADA)
الإصلاح: استبدال/ إصلاح العاكس
النتيجة: انخفاض إنتاج الطاقة

يُعدّ تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها (FMEA) مفيدًا بشكل خاص لتحديد المُكوّنات التي تُهيمن على وقت توقف المحطة.

9-12 تحليل شجرة الأعطال (Fault Tree Analysis) — المعيار IEC 61025

لنفترض أن الحدث الرئيسي (أو الحدث الأعلى) هو: عجز محطة الطاقة الكهروضوئية عن تزويد الشبكة بالطاقة حيث يمكن حينئذٍ بناء شجرة أعطال كما في الشكل 12- 6:



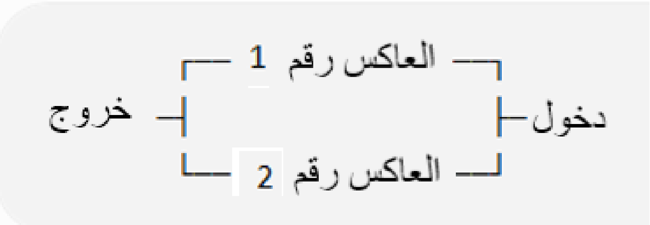
الشكل 12-6 .

وتُعد طريقة تحليل شجرة الأعطال (FTA) مفيدة بشكل خاص عند الرغبة في تحديد: احتمالية وقوع الحدث الرئيسي (Top Event)، مجموعات الأعطال الحرجة، الحد الأدنى لمجموعات القطع (Minimal Cut Sets)، نقاط الفشل الفردية، متطلبات التكرارية (Redundancy).

10-12 مخطط كتل الوثوقية (RBD) — المعيار IEC 61078

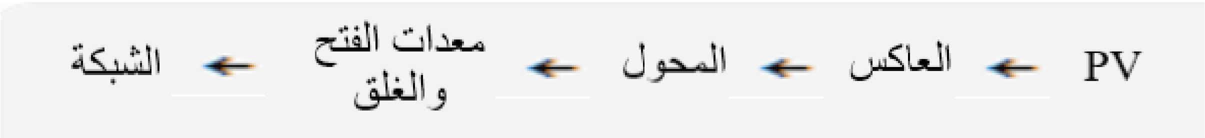
Reliability Block Diagram

يُعد مخطط كتل الوثوقية (RBD) تقنية أخرى سبق لك ذكرها. لنفترض وجود عاكسين (inverters) متطابقين يعملان على التوازي كما في الشكل 12-7 :



الشكل 12-7.

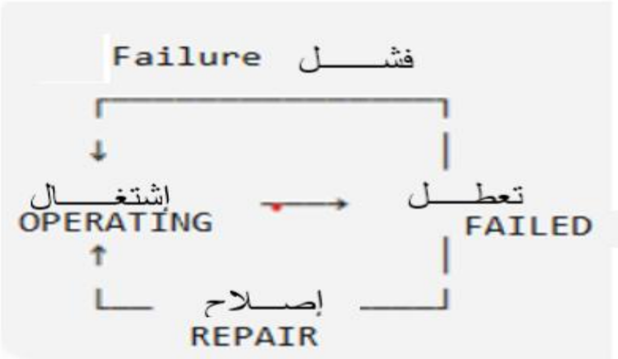
إذا استطاع أيٌّ من العاكسين الحفاظ على الخرج المطلوب، فإنّ الترتيب يتمتع بخاصية التكرار. ويختلف هذا اختلافًا جوهريًا عن الترتيب التسلسلي التالي :



في نموذج تسلسلي بسيط، يؤدي تعطل أي وحدة حرجة إلى تعطل النظام. لذا، يساعدك تحليل الوثوقية والتكرار (RBD) على تقييم ما يلي: التكرار، بنية التوالي/ التوازي، وثوقية النظام، التوافرية، المكونات الحرجة.

11-12 . نمذجة ماركوف Markov modelling

بالنسبة لأنظمة الطاقة المتجددة الأكثر تعقيداً، قد تكون نماذج ماركوف مفيدة. على سبيل المثال، يمكن أن يكون للمكوّن حالات متعددة ، أنظر الشكل 12-8 :



الشكل 12-8 حالات المكون أو العنصر المتعددة.

يمكن توسيع الشكل 12-8 هذا ليشمل: حالة التشغيل بكامل القدرة، حالة التشغيل بقدرة مخفضة، الفشل الجزئي، الاستعداد (الاحتياطي)، الإصلاح، الصيانة، التشغيل بمستوى أداء مخفض (derated operation).

وتصبح نماذج ماركوف مفيدة بشكل خاص عندما يتسم النظام بما يلي: حالات تشغيل متعددة، وجود احتياطي في وضع الاستعداد (standby redundancy)، مكونات قابلة للإصلاح، حالات فشل مترابطة (اعتمادية الفشل)، انتقالات معقدة بين الحالات.

12-12 . محاكاة مونت كارلو Monte Carlo simulation

تُعد محاكاة مونت كارلو مفيدة للغاية عند التعامل مع محطات الطاقة المتجددة الكبيرة. تتضمن العملية أخذ عينات عشوائية لـ: أعطال المكونات، أوقات الإصلاح، ظروف الطقس أو الموارد، الطلب، انقطاعات الشبكة، أعمال الصيانة، حالات المكونات. ثم تُجرى محاكاة لآلاف أو ملايين سيناريوهات التشغيل. من الناحية المفاهيمية:

ظروف طقس عشوائية + أعطال عشوائية + أوقات إصلاح عشوائية + ظروف الشبكة ⟵ محاكاة سنوية للمحطة ⟵ الطاقة غير الموردة ⟵ الوثوقية (الجهوزية) ⟵ فقدان الطاقة ⟵ مؤشرات الموثوقية ⟵ تكرار العملية مرات عديدة .

تنتج عن هذه العملية توزيعات احتمالية بدلاً من إجابة حتمية واحدة. على سبيل المثال:

- الإنتاج السنوي المتوقع للطاقة أي القيمة المتوقعة أو التقديرية التي يكون احتمال تجاوزها 50% واحتمال عدم الوصول إليها 50.%، فمثلاً في مشاريع الطاقة الشمسية أو الرياح :

- طاقة المستوى P50 = الإنتاج السنوي المتوقع في السيناريو المتوسط .
- طاقة المستوى P90 = إنتاج أكثر تحفظًا؛ هناك احتمال 90% أن يكون الإنتاج الفعلي أعلى منه.
- وقت التوقف المتوقع
- احتمالية تجاوز حد معين لوقت التوقف
- الطاقة المتوقع عدم توريدها
- احتمالية عدم كفاية التوليد

13-12. الوثوقية القائمة على الطاقة Energy-based reliability

بالنسبة لأنظمة الطاقة المتجددة، غالباً ما تكون وثوقية الطاقة أكثر دلالة وأهمية من مجرد حصر عدد حالات الفشل. لنأخذ على سبيل المثال محطة طاقة شمسية بقدرة 100 ميجاوات. قد يؤدي تعطل العاكس (inverter) لمدة ساعة واحدة - في ظل قدرة إنتاجية متاحة تبلغ 10 ميجاوات - إلى:

10 ميجاوات-ساعة من الطاقة المفقودة. ولكن، قد يؤدي تعطل العاكس نفسه ليلاً إلى:

0 ميجاوات-ساعة من الطاقة المفقودة.

وعليه:

لا توجد بالضرورة علاقة تناسبية بين ساعات التعطل وفقدان الطاقة.

يُعد هذا المفهوم أحد أهم المفاهيم في تقييم موثوقية أنظمة الطاقة المتجددة.

14-12. عامل السعة مقابل الوثوقية Capacity factor versus reliability

غالباً ما يحدث خلط بين عامل السعة والوثوقية . ان عامل السعة يعرف كالآتي:

$$\text{عامل السعة} = \frac{\text{الطاقة الحقيقية المولدة}}{\text{الزمن} \times \text{السعة المقتننة}}$$

$$CF = \frac{\text{Actual energy generated}}{\text{Rated capacity} \times \text{time}} \qquad (12.19)$$

على سبيل المثال، محطة بقدرة 100 ميجاوات تنتج 219,000 ميجاوات-ساعة سنوياً:

$$CF = \frac{219000}{100 \times 8760} = 25\%$$

إن عامل السعة البالغ 25% لا يعني أن وثوقية المحطة تقتصر على 25% فقط. فقد تكون المحطة متاحةً من الناحية الفنية بنسبة 99% من الوقت، ولكنها تعتمد ببساطة على مصدر طاقة متجدد متغيّر.

15-12 مقاييس الجاهزية (التوفرية) Availability metrics

بالنسبة لتوليد الطاقة المتجددة، يمكن حساب عدة مقاييس مختلفة للتوفرية (للجاهزية) .

- التوفرية الزمنية تعرف كالتالي :

$$A_t = \frac{\text{الزمن المتوفر}}{\text{الزمن المرجع}}$$

$$A_t = \frac{\text{Available time}}{\text{Reference time}} \quad (12.20)$$

- التوفرية التقنية ، من حيث المفهوم تعرف كالآتي :

$$A_{\text{تقنية}} = \frac{\text{المعدات الجاهزة فنياً للتشغيل}}{\text{الزمن المرجع}}$$

$$(12.21)$$

$$A_{technical} = \frac{\text{Time equipment is technically capable of operating}}{\text{Reference time}}$$

- التوافر القائم على الطاقة :

يأخذ هذا المفهوم في الاعتبار الطاقة التي كان من الممكن إنتاجها مقابل الطاقة المتاحة فعلياً من المعدات. وفيما يتعلق بتوليد الطاقة الريحية، توفر المواصفة IEC 61400-26-1 فئات معلومات موحدة لاستنباط مؤشرات التوافر القائمة على الزمن وتلك القائمة على الإنتاج والإبلاغ عنها. وتتناول المواصفة الفنية IEC TS 61400-26-4:2024 على وجه التحديد مقاييس الوثوقية لأنظمة طاقة الرياح، وتُطبّقها بدءاً من المكونات الفردية ووصولاً إلى التوربينات ومحطات طاقة الرياح ومحافظ الأصول.المواصفة الفنية للجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) رقم 61400-26-4 ، والمواصفة IEC TS 61400-26-4:2024 أنظمة توليد طاقة الرياح - الجزء 26-4: الوثوقية في أنظمة توليد طاقة الرياح تحدد هذه المواصفة الفنية (IEC TS 61400-26-4:2024) المصطلحات وفئات المعلومات اللازمة لتحديد مقاييس الموثوقية والإبلاغ عنها. وتسري هذه التعريفات على المكونات الرئيسية، وأي عدد من توربينات الرياح، وأساطيل من أنواع توربينات الرياح، ومحطة طاقة رياح...

16-12 وثوقية الشبكة Grid reliability

هنا تبرز أهمية سؤالك السابق حول معيار IEEE 1366-2022.

يعنى معيار IEEE 1366 في المقام الأول بمؤشرات وثوقية شبكات التوزيع الكهربائي، مثل:

SAIFI،

SAIDI،

CAIDI،

MAIFI.

وتصف هذه المؤشرات أداء الانقطاعات التي تؤثر على المشتركين أو نظام التوزيع.

ومع ذلك، عند إجراء دراسة لوثوقية محطة لتوليد الطاقة المتجددة، لا ينبغي الاعتماد تلقائياً على مؤشرات SAIFI أو SAIDI كمقاييس أساسية لوثوقية المحطة.

وبدلاً من ذلك، قد تحتاج إلى استخدام مقاييس أخرى، مثل:

- توافرية المحطة،
- معدل الانقطاع القسري،
- معدل الانقطاع القسري المكافئ،
- الطاقة غير المورَّدة،
- احتمالية فقدان الحمل،
- توقعات فقدان الحمل،
- الطاقة المتوقع عدم توفيرها،
- تقييد إنتاج الطاقة المتجددة،
- مدة انقطاع الشبكة.

17-12 احتمالية فقدان الطاقة وفقدان الحمل (LOLE/LOLP)

Loss of Energy & Loss of Load Probability — LOLE/LOLP

تكتسب معايير IEEE 1366 أهمية خاصة عندما تمتد دراستك لتشمل وثوقية نظام التوزيع أو الخدمة المقدمة للمشتركين. بالنسبة لتوليد الطاقة المتجددة المدمجة في نظام الطاقة، يصبح السؤال الرئيسي:

هل يمتلك النظام قدرة توليد كافية لتلبية الطلب؟

صيغة مبسطة:

$$LOLP = P(G < D) \qquad (12.22)$$

حيث:

G = التوليد المتاح،

D = الطلب.

إذا كان التوليد المتاح أقل من الطلب، تنشأ حالة "فقدان الحمل" (loss-of-load).

وبالنسبة للشبكات التي تعتمد بشكل كبير على مصادر الطاقة المتجددة، يتطلب ذلك نمذجة كل مما يلي:

تقلبات طاقة الرياح،تقلبات الطاقة الشمسية،انقطاعات التوليد التقليدي، التخزين، قيود النقل، الطلب، الربط البيني، الارتباطات المتبادلة المتعلقة بالطقس.

12-18 الطاقة المتوقعة غير المُلبّاة (EENS)

Expected Energy Not Served — EENS

يُعدّ مقياس وثوقية الطاقة هذا مفيدًا للغاية، وهو:

$$EENS = E[\text{energy demand not served}]$$

EENS = E [الطلب على الطاقة غير المُلبّاة]

يُعبّر عنه عادةً بوحدة: ميغاواط ساعة/ سنة

على سبيل المثال: EENS = 250 ميغاواط ساعة/سنة

يعني أن النموذج يُقدّر طلبًا متوقعًا على الطاقة مقداره 250 ميغاواط ساعة/ سنة، وهو طلب لا يُمكن تلبيته وفقًا لنموذج الوثوقية المُحدّد. وغالبًا ما يكون هذا المقياس أكثر فائدةً للتخطيط من مجرد تحديد احتمال تعطل النظام.

12-19 الاعتمادية وفشل الأسباب المشتركة

Dependency and common-cause failures

هذا جانبٌ غالباً ما يُغفَل عنه.

لنفترض أن محطة طاقة شمسية تضم 100 عاكس كهربائي (Inverter). قد يبدو الأمر كما يلي: "إذا تعطل عاكس واحد، فسيُفقد 1% فقط من القدرة الإنتاجية." ولكن، ماذا يحدث لو تسبب عاملٌ مشترك في تعطل جميع العواكس؟

أمثلة:

درجات حرارة قصوى، خلل في برمجيات نظام التحكم، تعطل شبكة الاتصالات، مشكلة شائعة في جهد التيار المستمر، الصواعق، الفيضانات، الحرائق، تعطل المحوّل، ارتفاع الجهد في الشبكة، عطل في نظام الحماية.

لذا، لا ينبغي أبداً افتراض استقلالية المكونات دون مبرر.

12-20 الوثوقية البيئية Environmental reliability

تعمل محطات الطاقة المتجددة في ظل ظروف بيئية يمكن أن تؤثر بشكل مباشر على معدلات الأعطال.

بالنسبة **للطاقة الشمسية Solar تؤثر العوامل البيئية التالية :**

درجة الحرارة، الرطوبة، التعرض للأشعة فوق البنفسجية، الغبار/التراكمات (الاتساخ)، الرذاذ الملحي، الرياح، البرد (حبات الثلج)، الثلوج، الفيضانات، الصواعق.

وبالنسبة لطاقة الرياح Wind تؤثر العوامل البيئية التالية :

سرعة الرياح، الاضطراب، درجة الحرارة، التجمد، الرطوبة، رذاذ الملح، البرق، العواصف، الأمواج لتوربينات الرياح البحرية.

لذلك: λ ليست ثابتة في جميع البيئات.

في العديد من التطبيقات الواقعية. قد يستخدم نموذج أكثر تطوراً الصيغة التالية:

$$\lambda=\lambda(x) \qquad (12.23)$$

حيث يمثل المتغير x الظروف البيئية أو التشغيلية.

21-12 الوثوقية ومعدل التدهور Degradation reliability

لا تقتصر الوثوقية على حالات الفشل المفاجئ فحسب. إذ يمكن أن تتعرض الألواح الكهروضوئية والبطاريات ومكونات توربينات الرياح لعملية تدهور في الأداء. على سبيل المثال:

$$P(t) = P_0 (1-d)^t \qquad (12.24)$$

حيث:

P_0 = الأداء الأولي،

d = معدل التدهور السنوي،

t = عدد السنوات.

ولكن، من الناحية المثالية، ينبغي نمذجة التدهور استناداً إلى أدلة خاصة بكل تقنية، بدلاً من افتراض معدل تدهور عام. وفيما يتعلق بالبطاريات، قد يعتمد التدهور على العوامل التالية:

درجة الحرارة، عمق التفريغ، معدل التيار (C-rate)، حالة الشحن، عدد الدورات، العمر الزمني.

22-12 الوثوقية مقابل الأداء Reliability versus performance

قد تتمتع المحطة بوثوقية عالية، إلا أن أداءها يكون ضعيفاً. على سبيل المثال:

المحطة (أ)

الإتاحة = 99%

عامل السعة = 20%

المحطة (ب)

الإتاحة = 95%

عامل السعة = 40%

يمكن للمحطة (ب) توليد كمية أكبر بكثير من الطاقة، رغم أن إتاحتها الفنية أقل.

لذا، ينبغي أن يأخذ التقييم السليم لمشاريع الطاقة المتجددة في الاعتبار ما يلي:
لذا، ينبغي أن يأخذ التقييم السليم لمصادر الطاقة المتجددة في الاعتبار:

الوثوقية + الجاهزية + إنتاج الطاقة + القابلية للصيانة

وذلك بدلاً من الاكتفاء بالنظر إلى رقم واحد.

23-12 . نمذجة الصيانة Maintenance modelling

يجب إدراج الصيانة بشكل صريح وكالآتي .

- الصيانة التصحيحية

تعطل المعدات ← الإصلاح ← العودة إلى الخدمة.

- الصيانة الوقائية

تتم صيانة المعدات وفقاً لجدول زمني مُخطط له.

الصيانة التنبؤية / القائمة على الحالة

تتم مراقبة حالة المعدات، ويتم البدء في إجراءات الصيانة بناءً على التدهور أو العطل المتوقع.

أمثلة:

مراقبة الاهتزازات، تحليل الزيت، التصوير الحراري، تحليلات أنظمة SCADA، تشخيص أعطال العاكسات (Inverters)، فحص الشفرات، الفحص باستخدام الطائرات المسيرة (الدرون)، مراقبة التفريغ الجزئي.

تقدم المواصفة IEC 60300-3-10:2025 إرشادات بشأن القابلية للصيانة وأعمال الصيانة، بما في ذلك برامج الصيانة، وخصائص القابلية للصيانة، والارتباطات مع الوثوقية والجاهزية، وإدارة بيانات الصيانة.

24-12 وقت الإصلاح Repair time

يُعد وقت الإصلاح أمراً بالغ الأهمية، لنفترض أن هناك مكونين لهما نفس معدل تكرار الأعطال:

المكون (أ) متوسط زمن الإصلاح

(MTTR) = 4 ساعات

المكون (ب) متوسط زمن الإصلاح

(MTTR) = 100 ساعة

سيكون تأثيرهما على الجاهزية (التوافرية) مختلفاً بشكل جذري.

بالنسبة لمحطات الطاقة المتجددة النائية أو البحرية، يمكن أن يتأثر متوسط زمن الإصلاح (MTTR) بشكل رئيسي بالعوامل التالية :

فترات الطقس المواتية، توافر السفن، توافر الرافعات، الفنيون المتخصصون، نقل قطع الغيار، إمكانية الوصول إلى الميناء، إمكانية الوصول عبر المروحيات، إمكانية الوصول عبر الطرق البرية، متطلبات عزل الشبكة.

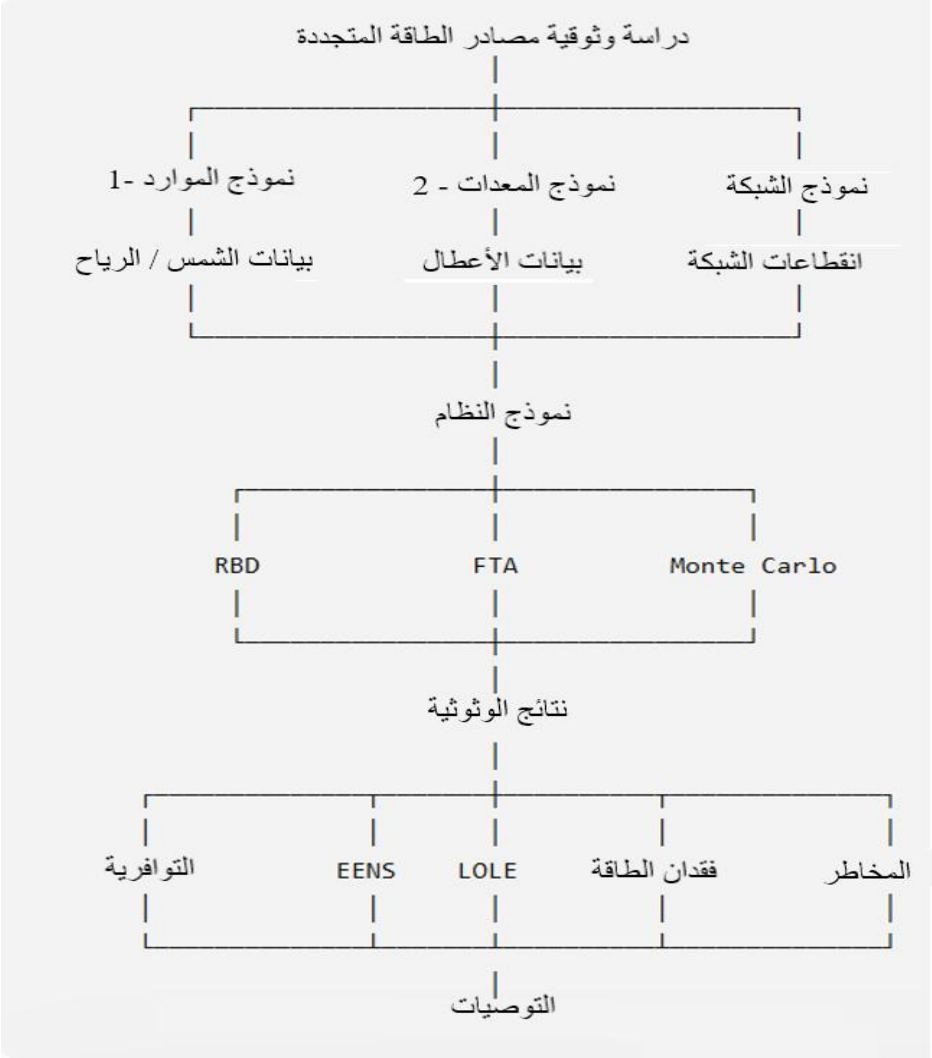
لذا، لا ينبغي لمهندس الوثوقية أن يعتمد مؤشر "متوسط زمن الإصلاح" (MTTR) ببساطة على النحو التالي:

"إصلاح الشركة المصنعة = 8 ساعات".

إذ قد يكون الزمن الفعلي لإعادة التشغيل أطول بكثير.

25-12 . هيكلية نموذج الوثوقية Reliability model structure

يمكن لدراسة شاملة أن تستخدم البنية التالية:



26-13 مثال على تقييم بسيط لوثوقية نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية

لنفترض: محطة طاقة شمسية كهروضوئية = 100 ميجاواط تحتوي على:

10وحدات عاكس طاقة، كل منها بقدرة 10 ميجاواط، وثوقية كل عاكس = 98.5 %

محولات،

نظام تجميع،

وصلة بالشبكة.

في حال تعطل أحد العواكس، تفقد المحطة حوالي 10 ميجاواط بدلاً من 100 ميجاواط كاملة. هذا يعني أن المحطة تتمتع بتكرار جزئي للطاقة. لذا، قد يتضمن نموذج بسيط الحالات التالية:

الحالة	القدرة المتاحة
جميع العواكس تعمل	100 ميجاوات
تعطل عاكس واحد	90 ميجاوات
تعطل عاكسين	80 ميجاوات
تعطل 3 عواكس	70 ميجاوات
...	...
تعطل 10 عواكس	0 ميجاوات

لنأخذ الآن عامل الإشعاع الشمسي في الاعتبار.

عند الساعة 12:00:

القدرة المتاحة (P_available) = 85 ميجاوات

في حال تعطل أحد العواكس (inverters):

القدرة المتاحة (P_available) = 75 ميجاوات

أما عند الساعة 18:00:

القدرة المتاحة (P_available) ≈ 10 ميجاوات

وقد لا يؤدي تعطل العاكس نفسه في هذه الحالة إلى أي فقدان إضافي يُذكر في الطاقة.

يوضح هذا المثال سبب تفوق المحاكاة القائمة على السلاسل الزمنية للطاقة -في كثير من الأحيان- على مجرد حساب نسبة مئوية واحدة للإتاحة.

الفصل 13

طرق تحسين الوثوقية

13-1مقدمة

يقدم هذا الفصل حقائق أساسية حول وثوقية الأنظمة الكهربائية وكيفية اتباع طرق لتحسينها لحلقاتها الثلاث التوليد والنقل والتوزيع حيث سيتم سرد التعريفات الأساسية مع الشروحات والأساليب اللازمة لتقييم أداء ووثوقية النظام. كما يقدم الفصل معلومات حول وثوقية تشغيل نظام التوزيع، وأكثر المشاكل شيوعًا في التشغيل اليومي لشبكات الكهرباء، وكيفية التخفيف من هذه المشاكل.

13-2 تحسين وثوقية نظام توليد الطاقة

يُعدّ تحسين وثوقية نظام توليد الطاقة هدفًا هامًا في أنظمة الطاقة الكهربائية، إذ يضمن إمدادًا مستمرًا وكافيًا بالكهرباء للمستهلكين. ويمكن تعزيز الوثوقية عبر عدة طرق، منها:

- **الخيار الأول**

1. زيادة القدرة الإنتاجية المركبة
   - الحفاظ على قدرة احتياطية كافية تتجاوز ذروة الطلب المتوقعة.
   - استخدام الاحتياطيات الدوارة (مولدات تعمل بحمل جزئي وجاهزة لزيادة الإنتاج بسرعة).
   - تركيب وحدات توليد احتياطية لحالات الطوارئ.
2. التزام الوحدات والتوزيع الاقتصادي
   - يضمن الجدولة السليمة لوحدات التوليد توفر كمية كافية من الطاقة.
   - تحسين تشغيل المولدات مع الحفاظ على هوامش احتياطية كافية.
3. الصيانة الوقائية
   - الفحص والصيانة الدورية للمولدات والتوربينات والغلايات والمحولات والمعدات المساعدة.
   - يمكن للصيانة التنبؤية باستخدام تقنيات مراقبة الحالة اكتشاف الأعطال قبل حدوثها.

4. التكرار في عدد المعدات

- استخدام وحدات توليد متعددة بدلاً من وحدة واحدة كبيرة.
- توفير أنظمة احتياطية للمكونات الحيوية مثل أنظمة الإثارة وأنظمة التحكم وأنظمة التبريد.

5. تنويع مصادر الطاقة

- الجمع بين التوليد الحراري والمائي والنووي والشمسي والريحي والغازي.
- تقليل الاعتماد على مصدر وقود أو تقنية واحدة.

6. أنظمة حماية محسّنة

- تركيب مرحلات وقواطع دوائر وأنظمة كشف أعطال موثوقة.
- ضمان عزل سريع للمعدات المعيبة لمنع الأعطال المتتالية.

7. أنظمة تحكم ومراقبة حديثة

- استخدام أنظمة التحكم الإشرافي واكتساب البيانات (SCADA)
- تطبيق أنظمة إدارة الطاقة (EMS) للمراقبة والتحكم في الوقت الفعلي.
- استخدام تقنيات الأتمتة المتقدمة وتقنيات الشبكات الذكية.

8. وثوقية إمدادات الوقود

- الحفاظ على احتياطيات كافية من الوقود لمحطات الطاقة الحرارية.
- استخدام مصادر وقود متعددة كلما أمكن ذلك.
- تأمين مرافق نقل وتخزين الوقود.

9. التخطيط المرتكز على الموثوقية

إجراء دراسات موثوقية مثل:

- احتمالية انقطاع التيار الكهربائي (LOLP)
- توقعات انقطاع التيار الكهربائي (LOLE)
- الطاقة المتوقعة غير المُخدَّمة (EENS)
- تخطيط توسيع النظام بناءً على معايير الموثوقية.

10. الربط مع أنظمة الطاقة الأخرى

- الربط مع شركات المرافق المجاورة أو الشبكات الإقليمية.
- يسمح بمشاركة الطاقة أثناء حالات الطوارئ ويُحسِّن أمن النظام بشكل عام.

11. دمج الطاقة المتجددة مع التخزين

- استخدام أنظمة تخزين طاقة البطاريات، وتخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ، وتقنيات تخزين الطاقة الأخرى التي تساعد في تعويض عدم انتظام توليد الطاقة المتجددة.

12. تدريب المشغلين والتخطيط للطوارئ

- تدريب مشغلي النظام على التعامل مع ظروف التشغيل غير الطبيعية.
- وضع خطط طوارئ لأعطال المعدات ونقص الوقود والكوارث الطبيعية.

- **الخيار الثاني**

1. زيادة احتياطي التوليد

- الحفاظ على احتياطي التشغيل (المولدات التي تعمل بأقل من طاقتها القصوى وجاهزة للاستجابة الفورية).
- إبقاء وحدات التوليد الاحتياطية متاحة لحالات الطوارئ.
- ضمان هامش احتياطي كافٍ فوق ذروة الطلب.

2. ربط أنظمة الطاقة

- ربط شبكات المرافق المجاورة أو الشبكات الإقليمية.
- يسمح بمشاركة موارد التوليد أثناء انقطاع التيار الكهربائي أو ذروة الأحمال.
- تحسين استقرارية النظام وتقليل من خطر انقطاع التيار الكهربائي على نطاق واسع.

3. الصيانة الوقائية

- الفحص والصيانة الدورية للمولدات والمحولات ومفاتيح التوزيع وأنظمة الحماية.
- تقليل من احتمالية تعطل المعدات.

4. استخدام معدات موثوقة

- تركيب مولدات ومحولات وقواطع دوائر وأنظمة تحكم عالية الجودة.
- استخدام معدات ذات أداء مثبت ومعدلات أعطال منخفضة.

5. التكرار (معيار N-1)

- توفير مكونات احتياطية أو مُكررة، مثل المولدات والمحولات وخطوط النقل.
- إستمرار النظام في العمل حتى في حال تعطل أحد مكوناته الرئيسية.

6. أنظمة حماية مُحسّنة

- استخدام مُرحّلات وقواطع دوائر حديثة، وأنظمة كشف أعطال متطورة.
- عزل الأجزاء المعيبة بسرعة لمنع حدوث أعطال مُتسلسلة.

7. التنبؤ بالأحمال والتخطيط لها

- التنبؤ الدقيق بالطلب المُستقبلي.
- ضمان توفر قدرة توليد كافية عند الحاجة.

8. تنويع مصادر الطاقة

- استخدام مزيج من الطاقة الحرارية والمائية والنووية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية وغيرها من المصادر.
- تقليل الاعتماد على نوع واحد من الوقود أو التقنية.

9. أنظمة تخزين الطاقة

- نشر البطاريات، أو تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ، أو تقنيات تخزين أخرى.
- توفير طاقة احتياطية والمساعدة في موازنة العرض والطلب.

10. تقنيات الأتمتة والشبكات الذكية

- تطبيق أنظمة التحكم الإشرافي وجمع البيانات (SCADA) وأنظمة إدارة الطاقة (EMS).
- تمكين المراقبة الآنية، واكتشاف الأعطال، واستعادة الخدمة بشكل أسرع.

11. إدارة جانب الطلب

- تشجيع المستهلكين على تقليل استهلاك الكهرباء أو نقله خلال فترات الذروة.

- تخفيف الضغط على نظام التوليد.

12. التخطيط والتوسع الأمثل للنظام

- تحديث البنية التحتية للتوليد والنقل والتوزيع بشكل دوري.
- تجنب نقص السعة مع ازدياد الطلب.

ملخص

الأساليب الرئيسية لتحسين وثوقية نظام التوليد هي:

1. سعة احتياطية كافية.

2. الربط مع أنظمة الطاقة الأخرى.

3. الصيانة الوقائية.

4. معدات موثوقة وأنظمة احتياطية.

5. أنظمة حماية فعالة.

6. التنبؤ الدقيق بالأحمال والتخطيط لها.

7. تخزين الطاقة وتنويع مصادر التوليد.

8. أتمتة الشبكات الذكية وإدارة الطلب. تساهم هذه الإجراءات مجتمعة في زيادة جاهزية النظام، وتقليل الانقطاعات، وضمان إمداد مستقر للطاقة الكهربائية.

3-13 تحسين وثوقية نظام النقل

يمكن تحسين وثوقية نظام النقل بتقليل احتمالية الأعطال والحد من تأثيرها عند حدوثها. وتشمل الطرق الرئيسية ما يلي:

1. توفير خطوط نقل احتياطية

- استخدام خطوط نقل متوازية أو مسارات نقل بديلة.
- في حال تعطل أحد الخطوط، يمكن الاستمرار في تزويد الطاقة عبر مسار آخر.
- ويُصمم هذا النوع عادةً وفقًا لمعيار موثوقية N-1.

2. بنية الشبكة المترابطة

- استخدام نظام نقل متشابك (شبكي) بدلاً من نظام شعاعي بسيط.
- توفر هذه البنية مسارات متعددة لتدفق الطاقة، مما يزيد من الوثوقية.

3. الصيانة الوقائية

- الفحص والصيانة الدورية لخطوط النقل والأبراج والعوازل والمحطات الفرعية.
- تكشف هذه البنية عن العيوب وتعالجها قبل حدوث الأعطال.

4. تحسين أنظمة الحماية

- تركيب مرحلات حديثة وقواطع دوائر وأنظمة حماية مدعومة بالاتصالات.
- يمنع الكشف السريع عن الأعطال وعزلها انقطاعات واسعة النطاق.

5. استخدام معدات عالية الجودة

- استخدام موصلات وعوازل ومحولات ومفاتيح كهربائية موثوقة.
- يقلل ذلك من معدلات تعطل المعدات.

6. إدارة الغطاء النباتي ومسارات خطوط النقل

- تقليم الأشجار والحفاظ على مسافات كافية حول خطوط النقل.
- يمنع ذلك الأعطال الناتجة عن ملامسة الغطاء النباتي.

7. الحماية من الصواعق والارتفاعات المفاجئة في التيار الكهربائي

- تركيب أسلاك حماية، ومانعات للارتفاعات المفاجئة في التيار الكهربائي، وتأريض مناسب.
- يحمي ذلك النظام من الأعطال الناتجة عن الصواعق والجهود الزائدة.

8. مراقبة الحالة وإدارة الأصول

- استخدام أجهزة الاستشعار، والطائرات بدون طيار، والتصوير الحراري، وأنظمة المراقبة عبر الإنترنت.
- يمكّن ذلك من الكشف المبكر عن ارتفاع درجة الحرارة، أو التآكل، أو تدهور العزل.

9. أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة وأجهزة التحكم في الفولتية:

استخدام أجهزة مثل مُعوضات القدرة التفاعلية الثابتة (SVCs)، ومُعوضات القدرة التفاعلية الثابتة (STATCOMs)، ومُعوضات التوالي. يحسن ذلك من استقرار الفولتية وقدرة نقل الطاقة.

10. أنظمة احتياطية في المحطات الثانوية

- توفير محولات كهربائية وقضبان توصيل ومعدات حيوية احتياطية في المحطات الثانوية .
- يضمن ذلك استمرار التشغيل أثناء أعطال المعدات.

11. أنظمة التحكم الإشرافي وجمع البيانات (SCADA) وأنظمة المراقبة واسعة النطاق

- المراقبة والتحكم في شبكات النقل في الوقت الفعلي.
- يُمكّن ذلك المشغلين من الاستجابة السريعة للاضطرابات.

12. التخطيط السليم وتوسيع النظام

- رفع سعة النقل لتلبية الطلب المتزايد.
- تجنب التحميل الزائد والازدحام الذي قد يؤدي إلى أعطال.

ملخص

تشمل الطرق الرئيسية لتحسين وثوقية نظام النقل ما يلي:

1. خطوط نقل احتياطية ومسارات طاقة بديلة.
2. تشغيل الشبكة المترابطة.
3. الصيانة الوقائية.
4. أنظمة حماية سريعة وموثوقة.
5. الحماية من الصواعق وإدارة الغطاء النباتي.
6. مراقبة الحالة والأتمتة.
7. أنظمة احتياطية في المحطات الثانوية ومعدات التحكم في الفولتية.
8. التخطيط السليم وتوسيع شبكة النقل.

تُقلل هذه الإجراءات من انقطاعات التيار الكهربائي، وتُحسّن أمن النظام، وتضمن استمرار إمداد الطاقة للمستهلكين.

4-13 تحسين وثوقية نظام التوزيع

توجد طرق عديدة لتقليل انقطاعات التيار الكهربائي طويلة الأمد في أنظمة التوزيع . تشمل هذه الطرق ما يلي :

1- تقليل الأعطال: تقليم الأشجار، وتركيب حواجز حماية الحيوانات، ومانعات الصواعق، ودوريات فحص الدوائر الكهربائية.

2- الكشف عن الأعطال واستبدالها بسرعة أكبر: مؤشرات الدوائر المعيبة، ونظام إدارة الانقطاعات، وتوفير فرق العمل، وتحديد أعطال الكيبلات.

3- الحد من عدد المشتركين المتضررين: زيادة عدد المصهرات، وأجهزة إعادة الغلق والتوصيل التلقائية، وأجهزة الفصل.

4- قطع التيار عن المشتركين فقط في حالة الأعطال الدائمة: استخدام أجهزة إعادة الغلق والتوصيل التلقائية بدلاً من المصهرات، وتطبيق أنظمة ترشيد استهلاك المصهرات. سواءً أكانت هناك حاجة لتعزيز وثوقية خط نقل محدد أو متطلب لزيادة وثوقية النظام ككل، فإن الخطوات الرئيسية التي يجب تنفيذها يمكن تلخيصها فيما يلي:

- تحديد المشاريع المحتملة
- تقدير تكاليف كل تكوين أو خيار
- تقدير التحسن في الموثوقية مع كل خيار مُختار
- ترتيب المشاريع بناءً على نسبة التكلفة إلى الفائدة

عادةً ما يكون من السهل التنبؤ بالتكاليف، بينما قد يكون التنبؤ بالتحسين أكثر صعوبة.

كذلك يُعدّ تحديد مقياس الوثوقية الذي يحتاج إلى تحسين إجراءً هامًا لتحسين الوثوقية. قد يكون هذا المقياس SAIFI أو SAIDI أو مزيجًا منهما، أو أي مقياس آخر مختلف تمامًا. بناءً على الترتيب النهائي للأهداف، وقد تتغير أولوية المشاريع. لقد ثبت أن معدل انقطاع التيار الكهربائي هو الأهم بالنسبة للعملاء بالتأكيد إلى أن يطول أمد الانقطاع. ويستمر منظمو النظام في تفضيل مؤشرات المدة لأنها مقياس لاستجابة شركات الكهرباء، وقد يظهر خفض التكاليف غير المقيد في البداية على شكل وقت استجابة مطول لانقطاعات النظام.

عادةً ما يتم تحليل المشاريع وترتيب أولوياتها على نطاق واسع. وتتطلب المشاريع واسعة النطاق غالبًا تبسيطًا، وأحيانًا تنطوي على افتراضات لا مفر منها. يمكن التنبؤ بجميع تغييرات تكوين الشبكة، مثل

تنفيذ أجهزة إعادة الغلق الذاتية Auto-Reclosing وإضافة المزيد من نقاط المصاهر وأتمتة المفاتيح. ويمكن قياس هذه التحسينات كميًا بواسطة العديد من برامج الحاسوب. مع ذلك، تُعدّ المشاريع التي يهدف أساسًا إلى تقليل معدلات الأعطال، والتي تشمل تقليم الأشجار المجاورة لخطوط التوزيع الهوائية، وإضافة المزيد من مانعات الصواعق، وتركيب حواجز للحيوانات، تعد صعبة القياس والتقييم. كما أن تحسين التقنيات وتحديث الأنظمة المستخدمة لتحديد مواقع الأعطال وإصلاحها، يصعب تحديدها رقميًا. عادةً ما تُجرى تحليلات حساسية للمساعدة في تحديد أولوية المشروع. وبدلًا من استخدام رقم أداء واحد، يمكن اعتبار استخدام رقم منخفض، ورقم تقديري، ورقم تقديري مرتفع، نهجًا جيدًا، ولكن في أبسط صوره. كما أن تحديد أسباب الأعطال بدقة يساعد في تقييم نوع ومدى فائدة هذه الحلول المُستهدفة. على سبيل المثال، إذا كان هناك عدد قليل فقط من الأعطال الناتجة عن الصواعق، فلن تُحقق مانعات الصواعق الإضافية فائدة كبيرة.

5-13 استهداف الدوائر المحددة

ليست جميع دوائر التوزيع متماثلة. عادةً، تكون الأجزاء الأكثر أهمية ليست تلك التي تشهد أكبر عدد من الأعطال لكل كيلو متر طول . كما أن نوع المستهلكين وعدد هؤلاء المستهلكين على دائرة معينة يُعدّان من الاعتبارات المهمة للغاية. على سبيل المثال، يجب التعامل مع دائرة ضواحي مدينة تضم العديد من العملاء التجاريين أو الصناعيين بطريقة مختلفة عن الدائرة الريفية والنائية التي تضم عددًا قليلاً من العملاء السكنيين والزراعيين. وتعتمد طريقة التعامل مع هذه الدوائر على فلسفة شركة الكهرباء وترتيب أولوياتها. ويُعدّ خط النقل الرئيسي ثلاثي الأطوار بالغ الأهمية في دوائر التوزيع الشعاعية.

تؤدي الانقطاعات المستمرة في خطوط التغذية الرئيسية إلى انقطاع التيار الكهربائي عن جميع المستهلكين حتى يتم إصلاح العطل. كما أن الخطوط الرئيسية الطويلة جدًا تشهد انقطاعات أكثر من دوائر النقل الأقصر. وهناك العديد من الطرق الشائعة المستخدمة لتقليل مخاطر انكشاف الخطوط الرئيسية، ومنها تقليم الأشجار بشكل متكرر على طول ممر دائرة النقل. كما تساعد مفاتيح الفصل المستخدمة على خطوط التوزيع الرئيسية في إعادة التيار الكهربائي بسرعة للمستهلكين قبل موقع العطل. وقد أثبتت المفاتيح الآلية فعاليتها بشكل أكبر لهذا الغرض.

تشمل التحسينات الأخرى استخدام مفاتيح ربط مفتوحة عادةً مع مغذيات أخرى، وتمكين فرق الصيانة من تحويل أحمال المستهلكين إلى مغذيات أخرى أثناء عمليات الفصل. وتُعدّ الأعطال الجانبية أيضًا نوعًا مهمًا من الأعطال التي يجب أخذها في الاعتبار. ويمكن تصنيف هذه الأعطال حسب الأداء التاريخي مع

مراعاة أطوالها وعدد المشتركين المتصلين بها. وتُظهر التجربة أن الخطوط الجانبية الأطول قد تكون أنسب لأجهزة إعادة الغلق الذاتي أحادية الطور بدلًا من المصهرات.

6-12 تحديد أسباب الأعطال ومعالجتها

يساعد تتبع أنواع الأعطال المحددة وحلها على التركيز على التحسينات.على سبيل المثال، إذا لم تكن الحيوانات تتسبب في أي أعطال، فلا داعي لتطبيق حواجز الحيوانات. من الممارسات الشائعة لدى العديد من شركات الكهرباء العامة وسم الانقطاعات برموز تعريفية. تُنظم هذه المعلومات عادةً في قاعدة بيانات على مستوى النظام، والتي يمكن أن توفر تعريفات تُستخدم للمساعدة في تحسين وثوقية النظام في المستقبل.

من الواضح أن الأسباب المختلفة للأعطال قد تؤدي إلى مؤشرات وثوقية مختلفة. كذلك، قد تتباين التأثيرات النسبية بشكل كبير، فعلى سبيل المثال، قد تتسبب الأشجار في زيادة وقت الإصلاح، لكنها عادةً ما تؤثر على عدد أقل من العملاء. ويمكن أن يساعد الاحتفاظ بسجل لهذا النوع من المعلومات شركات المرافق على تحديد المشكلات المتكررة في منطقة خدمة معينة. هذه الأرقام ليست موحدة وتتغير باختلاف المنطقة تبعًا للطقس والفصل وأساليب البناء المستخدمة وكثافة الأحمال والعديد من العوامل الأخرى.

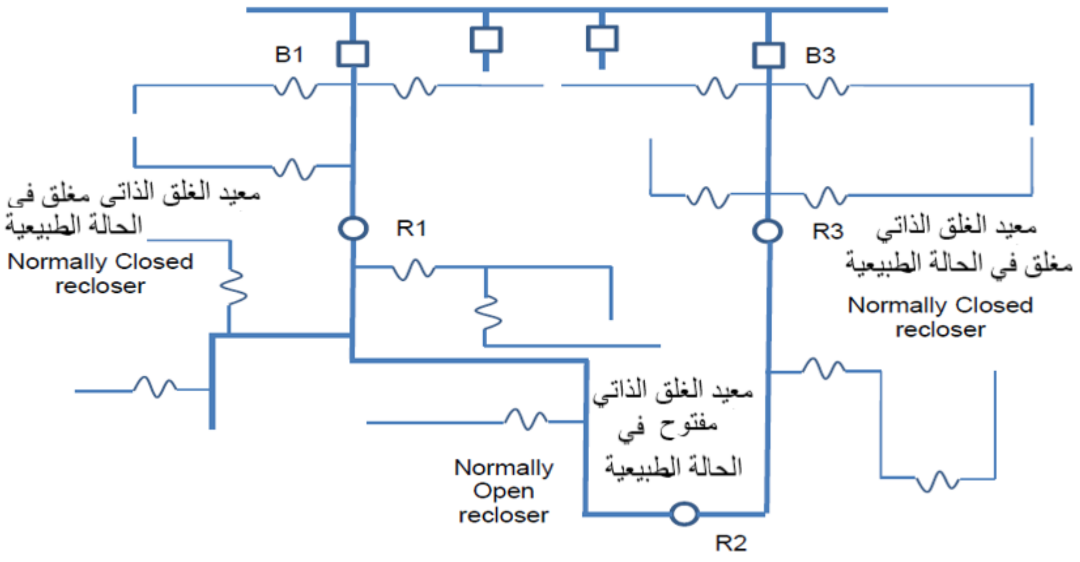
7-12 إجراءات الأتمتة

يمكن لأتمتة النظام الكهربائي أن توفر خيارات وبدائل أكثر لزيادة وثوقية نظام التوزيع. على سبيل المثال، تُعدّ طوبولوجيا التوزيع المؤتمتة ذات الحلقة التلقائية تقنية شائعة الاستخدام لزيادة وثوقية الدائرة الشعاعية المفتوحة عادةً. تقوم هذه الأنظمة تلقائيًا بتغيير تكوين نظام التوزيع، دون الحاجة إلى تدخل خارجي. في المثال الموضح في الشكل 13-1 ، توجد ثلاثة قواطع إعادة توصيل. إذا حدث العطل قبل قاطع إعادة التوصيل R1، فسيكون تسلسل التشغيل الطبيعي كما يلي:

- يكتشف القاطع B1 العطل ويبدأ دورة إعادة التوصيل، فيُفتح القفل.

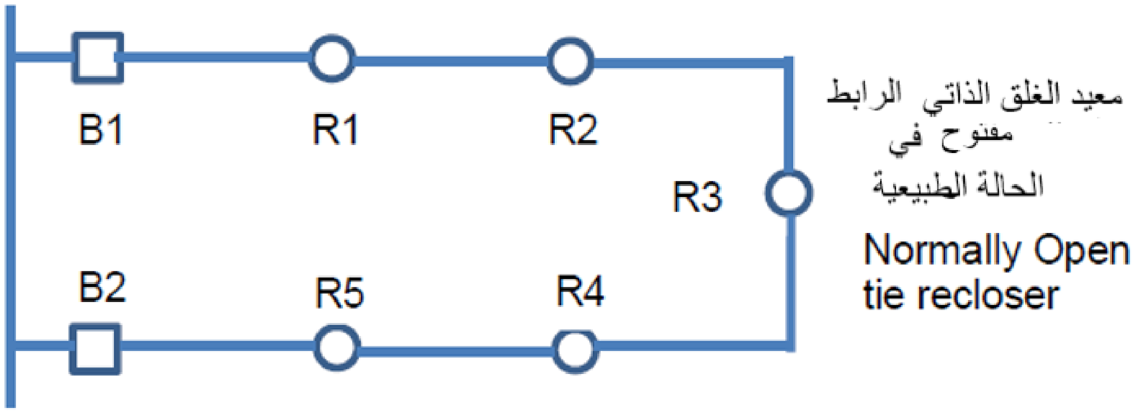
- يستشعر قاطع إعادة التوصيل R1 انخفاض الفولتية ويفتح.

- يستشعر قاطع إعادة الغلق الذاتي R2، أو ما يُسمى بقاطع إعادة التوصيل الرابط، انخفاض الفولتية في الدائرة، ويُغلق. بما أن قاطع إعادة الغلق R2 يُمكن توصيله بشبكة بها عطل، فعادةً ما يُضبط على إجراء واحد، فإذا استمر العطل، فسيفصل ويبقى مفتوحًا.



الشكل 13-1 ترتيب مرحلات إعادة غلق ذاتي .

يمكن إضافة المزيد من قواطع إعادة الغلق الذاتي (إعادة التوصيل) لتقسيم الدائرة إلى أقسام أكثر(انظر الشكل 13-2) ، ولكن في هذه الحالة، قد يصبح تنسيق جميع قواطع إعادة التوصيل أمرًا صعبًا. إذا نظرنا إلى الدائرة مع خمسة قواطع إعادة توصيل، نلاحظ أن كل مغذي يحتوي على قاطعَي إعادة توصيل مغلقين عادةً وهناك قاطع إعادة توصيل مفتوح عادةً في منتصف الدائرة. في حالة حدوث عطل في المغذي 1، سيتم فصل القاطع B1، وسيفتح قاطع إعادة التوصيل R1، وسيُغلق قاطع إعادة التوصيل R3. في هذه الحالة، ستكون هناك دائرة شعاعية طويلة مع تشغيل قاطع الدائرة الرئيسي B2 ، وستكون موصولة على التوالي مع أربعة قواطع إعادة توصيل.



الشكل 13-2 إضافة المزيد من قواطع إعادة الغلق الذاتي.

لتسهيل التنسيق، يمكن لبعض قواطع إعادة التوصيل خفض خصائص فصلها عند تشغيلها في الوضع العكسي. لذا، في هذه الحالة تحديدًا، سيقوم قاطع إعادة التوصيل R2 بخفض إعداد التقاط التيار الخاص به. يرى قاطع إعادة التوصيل R2 تيارات عطل أقل من المعتاد ويحتاج إلى الفصل قبل قاطعي إعادة التوصيل R3 أو R4. في حالة حدوث عطل بين القاطع B1 وقاطع إعادة التوصيل R1، ستستجيب الحلقة المكونة من خمسة قواطع إعادة توصيل بطريقة مشابهة لاستجابتها في حالة حلقة مكونة من ثلاثة قواطع إعادة توصيل:

- سيفتح قاطع الدائرة B1

- سيفتح قاطع إعادة التوصيل R1 لأنه سيكتشف انخفاضًا في الفولتية

- سيخفض قاطع إعادة التوصيل R2 قيمة فصله

- سيكتشف قاطع إعادة التوصيل R3 انخفاضًا في الفولتية على المغذي 1 وسيغلق

في حال حدوث عطل بين قاطعي إعادة التوصيل R1 وR2، يصبح تسلسل التشغيل أكثر تعقيدًا، ويمكن تلخيصه كما يلي:

- سيفتح قاطع إعادة التوصيل R1

- سيخفض قاطع إعادة التوصيل R2 قيمة فصله، وسيعمل على فصل الدائرة مرة واحدة حتى يتم إيقافه نهائيًا.

- سيكتشف قاطع إعادة التوصيل R3 انخفاض الجهد على المغذي 1 (وسيغلق مع استمرار وجود العطل).

- سيفصل قاطع إعادة التوصيل R2 دفعة واحدة نظرًا لانخفاض قيمة فصله.

تستخدم شركات الكهرباء العامة أشكالًا مختلفة من هذا المخطط، وفي بعضها تستخدم قواطع الفصل بدلًا من قواطع إعادة التوصيل في الموضعين R2 وR4، نظرًا لسهولة تنسيق قواطع الفصل مع العديد من الأجهزة المتصلة على التوالي. وتُعد المفاتيح التي يتم التحكم بها عن بُعد خيارًا إضافيًا لأتمتة دائرة التوزيع. تتميز المفاتيح التي يتم التحكم بها عن بُعد بمرونة أكبر من مخططات الحلقة التلقائية، نظرًا لسهولة تنفيذ المزيد من نقاط الربط، وعدم الحاجة إلى القلق بشأن تنسيق أجهزة الحماية. في معظم الحالات، يتخذ مشغلو النظام قرارات بشأن إعادة تكوين الشبكة. حتى في حالة أتمتة تشغيل الدائرة، فإن خطوة أخرى تتمثل في الفصل داخل قسم معزول بالفعل يمكن أن تُحسّن الوثوقية بشكل أكبر. وقد ثبت أن فصل أقسام الدائرة المعزولة بالفعل يمكن أن يقلل مؤشر SAIDI بنسبة كبيرة. في كثير من الحالات الأخرى، يجب على

مشغلي المرافق العامة وفرق الصيانة تحديد ما إذا كان سيتم فصل شبكة التوزيع أم لا. لن تُساعد الحلقات التلقائية بالتأكيد في حل مشكلة الانقطاعات اللحظية. يمكن لأتمتة الشبكة تحويل الانقطاعات طويلة الأمد إلى انقطاعات لحظية.

بعد إدخال تحسينات على الأتمتة، يمكن النظر في خطط لتحسين حالات الانقطاع المؤقتة بشكل أكبر:

- قواطع إعادة التوصيل الرئيسية - كجزء من نظام آلي، يمكن لقواطع إعادة التوصيل الرئيسية أن تُحسّن بشكل ملحوظ من انقطاعات التيار اللحظية؛ بينما لا تُحسّنها المفاتيح الآلية. استخدام قواطع إعادة التوصيل أحادية الطور يُساعد في تقليل عدد المستهلكين الذين ينقطع عنهم التيار.

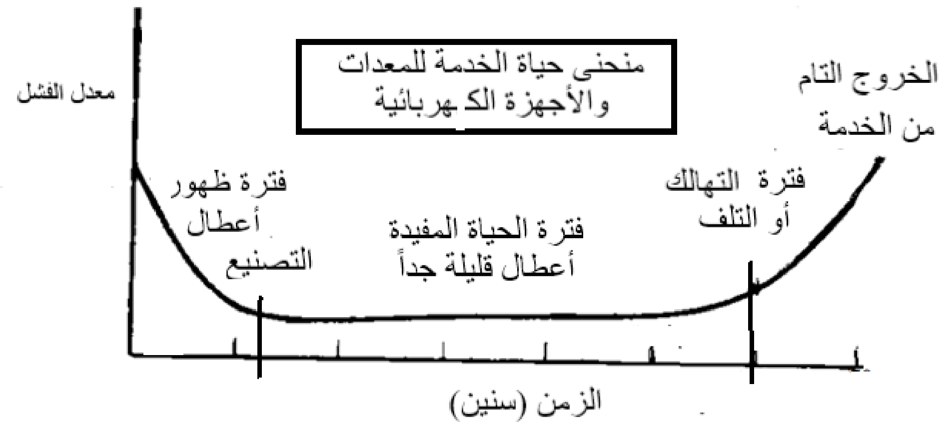
- قواطع إعادة التوصيل الفرعية - يمكن استخدام قواطع إعادة التوصيل الفرعية على الفروع الجانبية الطويلة. يمكن النظر في استخدام قواطع إعادة التوصيل أحادية الطور على الفروع الفرعية ثلاثية الطور. سيؤدي ذلك إلى تقليل عدد المستهلكين الذين ينقطع عنهم التيار.

8-13 معدات الحماية والتحويل (معدات الفتح والغلق) Protection and Switching Equipment

يُتيح تركيب المزيد من مفاتيح الفصل، وأجهزة إعادة التوصيل، والصمامات فرصةً لعزل أجزاء أصغر من دائرة التوزيع، وبالتالي تقليل عدد المشتركين المتأثرين. تُزود نقاط التوزيع الفرعية عادةً بصمامات، وذلك لضمان الموثوقية. تُعتبر الصمامات من أرخص الوسائل لاكتشاف الأعطال. من الممارسات الجيدة أن تكون نسبة كبيرة من نقاط التوزيع الفرعية المزودة بصمامات مُغطاة بنسبة عالية من التيار الكهربائي، بحيث عند حدوث عطل دائم في الدائرة في تلك الأجزاء، يتأثر عدد قليل فقط من المشتركين المتصلين.

9-13 الفحص والصيانة

لقد ثبت أن أفضل ممارسات الصيانة للعديد من شركات الكهرباء هي تقليم الأشجار. إذا كانت هذه العمليات معقدة وتتطلب تنفيذها في مناطق نائية، فيمكن اعتبارها من أكبر نفقات الصيانة لتلك الشركات. ومع ذلك، فإن صيانة دوائر التوزيع، بخلاف قطع الأشجار وتقليمها، تختلف اختلافًا كبيرًا. إن معظم معدات التوزيع، مثل المكثفات، ومحولات التوزيع، والعوازل، والكيبلات، والأسلاك، لا تحتاج إلى صيانة. لكن أجهزة إعادة التوصيل، والمنظمات، والمفاتيح المملوءة بالزيت، تحتاج إلى صيانة دورية. يتضمن ذلك تحديد المعدات القديمة والمعيبة، وتوجيهها للصيانة أو الاستبدال. وتتدهور حالة معظم المعدات بمرور الوقت. لدى العديد من شركات الكهرباء بنية تحتية قديمة.وتختلف معدلات تعطل المعدات المختلفة، وتتغير بمرور الوقت. ويأخذ منحنى الأعطال شكل "حوض الاستحمام" (الشكل 13-3).



الشكل 13-3 منحنى الأعطال للمعدات والأجهزة (شكل "حوض الاستحمام").

في الشكل 13-3 يكون هناك معدل فشل مرتفع خلال الفترة الأولية من عمر المعدات، ويعود ذلك أساسًا إلى عيوب التصنيع. يلي ذلك فترة من معدلات الفشل "الطبيعية" التي تزداد تدريجيًا مع تقدم عمر المعدات. بعض المعدات لديها معدلات فشل أعلى وأسرع مقارنةً بغيرها. لسوء الحظ، يصعب العثور على هذه المعلومات، ومصدرها الموثوق هو سجلات صيانة شركات الكهرباء . على سبيل المثال، كانت الأجيال الأولى من الكيبلات البلاستيكية (البولي إيثيلين عالي الوزن الجزيئي والبولي إيثيلين المتشابك) تعاني من معدلات فشل عالية. كما أن محولات التوزيع القديمة أكثر عرضة للأعطال، ولكن لا يمكن تبرير استبدالها بناءً على عمرها فقط. الكيبلات الأرضية هي المعدات الوحيدة التي تستبدلها شركات الكهرباء بناءً على عمرها فقط. وتعتمد الصيانة أيضًا على الأحوال الجوية، فعلى سبيل المثال، يمكن أن تتسبب العواصف في أضرار جسيمة عن طريق قطع الخطوط الهوائية المعلقة والمعدات.

تتطلب هذه الظروف إصلاحًا من قِبل فرق الصيانة. يمكن أن يساعد تتبع جودة المعدات وحالتها منذ البداية في تحسين وثوقية المعدات بشكل عام. في العديد من خطوط النقل الهوائية، تكون الأسباب الرئيسية للأعطال خارجية وليست ناتجة عن خلل في المعدات (عادةً ما يمكن اعتبار حوالي 10 إلى 20% من الأعطال أعطالًا في المعدات). ومع ذلك، فإن تتبع أعطال المعدات واستهداف الأجزاء التي قد تكون عرضة للعطل يمكن أن يساعد في تحسين الوثوقية. لسوء الحظ، لا تقوم العديد من شركات الكهرباء بتتبع أعطال المعدات الكهربائية، ولكن بعض شركات الكهرباء لديها أنظمة مُطبقة لتتبع المعدات الكهربائية وأعطالها. لقد لوحظ أن الأعطال تظهر في مجموعات ويمكن تجميعها بناءً على مُصنّعين مُحددين أو طرازات مُحددة أو تواريخ إنتاج مُحددة. وسواء كان ذلك نوعًا مُعينًا من الموصلات أو الصمامات أو عازلًا مُحددًا، فإن بعض المعدات لديها معدلات فشل أعلى بكثير من المتوقع.

يُمكن أن يُساهم الاستخدام السليم للمعدات في زيادة الوثوقية العامة؛ على سبيل المثال، عدم تحميل المعدات فوق طاقتها وتطبيق الحماية المناسبة ضد ارتفاعات التيار المفاجئة. تُسبب أعطال المعدات انقطاعات عديدة إذا حدثت في الدوائر الكهربائية تحت الأرض. يُمكن أن يُساعد تتبع هذه الأعطال (سواءً حسب سنة التركيب أو نوع التركيب) وأعطال الملحقات، ثم استبدال المعدات ذات مؤشرات الوثوقية، في تحسين الوثوقية. ويُمكن أن تُساعد مراقبة أحمال الدوائر الكهربائية والاحتفاظ بمعلومات عنها في التمييز بين الدوائر التي قد تتعطل نتيجة الإجهادات الحرارية.

يمكن تحديد المعدات الرديئة قبل دخولها الخدمة من خلال إجراء اختبارات قبول الجودة. وتُعدّ هذه الاختبارات بالغة الأهمية للكيبلات الأرضية. تشمل هذه الاختبارات فحص شرائح من الكيبلات للكشف عن الفراغات في العينات. ويمكن الكشف عن دفعات الكيبلات المعيبة من خلال اختبار الجهد العالي. وتلعب جودة الصنع دورًا هامًا في جودة وصلات الكيبلات الأرضية Cable Joints ؛ لذا، فإن تتبع هذه المعلومات يُسهم في منع حدوث مشاكل مستقبلية. على سبيل المثال، إذا تعطلت وصلة كيبل بعد ستة أشهر، وكان معروفًا من قام بتركيبها، فإنه يُمكن القضاء على المشاكل المستقبلية أو منعها، بغض النظر عما إذا كان العطل ناتجًا عن سوء الصنع أو عن خلل في جودة التصنيع.

تستخدم شركات الكهرباء برامج وأساليب فحص مختلفة لتحسين وثوقية النظام بشكل عام. ومن بين تقنيات فحص خطوط التوزيع ما يلي:

- الفحص البصري: غالبًا ما تكتشف فرق الصيانة مشاكل جسيمة مثل الأعمدة المتآكلة بشدة، وأسلاك التوصيل التالفة أو المقطوعة، والعوازل المكسورة. وتجري بعض شركات الكهرباء عمليات فحص بصري دورية ومخططة ولكن في أغلب الأحيان، تفحص فرق الصيانة الدوائر الكهربائية أثناء أنشطتها الأخرى. وفي بعض الحالات، تجري نفس الفرق عمليات فحص بصري موجهة بناءً على أداء الدائرة. وتُعدّ عمليات الفحص البصري الأكثر فعالية هي تلك التي تركز على اكتشاف مصادر الأعطال التي قد تكون خفية. ويحتاج فريق الصيانة إلى التدريب اللازم لاكتشافها.

- التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء - تستخدم حوالي 40% من شركات الكهرباء الأشعة تحت الحمراءلفحص الدوائر الكهربائية العلوية والأرضية. بشكل أساسي، تبحث فرق الصيانة عن ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار 20 درجة مئوية، وتبدأ فورًا بالإصلاح إذا تم اكتشاف ارتفاع في درجة الحرارة بمقدار 30 درجة مئوية أو أكثر. ويكشف المسح بالأشعة تحت الحمراء عن ضعف الموصلات والوصلات غير المحكمة. تُظهر التجربة أن بعض شركات الكهرباء لا تستخدم المراقبة بالأشعة تحت الحمراء لأنها

وجدتها غير فعالة. من ناحية أخرى، وجدت العديد من شركات الكهرباء فوائد كبيرة للمراقبة بالأشعة تحت الحمراء.

- اختبارات أعمدة الخشب - تُحدد الأعمدة الضعيفة عادةً بإجراء فحوصات بصرية. تمتلك العديد من شركات الكهرباء تقنيات أكثر دقة لـ قياس القوة الميكانيكية للأعمدة. تشمل هذه التقنيات اختبارات المطرقة وضرب العمود بمطرقة ثقيلة. كما يمكن لأجهزة الاختبار الصوتي تحديد كثافة الخشب والكشف عن الفراغات.

- عدادات التشغيل - تقرأ العديد من شركات الكهرباء من حين لآخر عدادات تشغيل قواطع إعادة التوصيل و عدادات تغيير فولتية منظم الفولتية لتحديد ما إذا كانت هناك حاجة للصيانة.

- اختبارات الزيت - تجري بعض شركات الكهرباء اختبارات على الزيت في محولات التوزيع وقواطع إعادة التوصيل ومنظمات الفولتية . تُعد هذه الاختبارات فعالة للغاية لأنها تكشف عن التدهور من خلال وجود الماء أو الغازات المذابة في الزيت، مما قد يؤدي فعليًا إلى انهيار كهربائي في الزيت. لسوء الحظ، قد تكون هذه الاختبارات مكلفة، ولا يمكن تبريرها بسهولة لمعظم معدات توزيع الكهرباء.

يُعدّ فحص محطات التوزيع الثانوية وصيانتها إجراءً مقبولاً على نطاق واسع. تقوم غالبية شركات الكهرباء بتتبع عدد مرات تشغيل أجهزة إعادة التوصيل، والمنظمات، وقواطع الدائرة الكهربائية، كما تتحقق معظمها من حالة زيت محولات محطات التوزيع.

10-13 الحد من الأعطال Reduction of Fault

إنّ أبسط طريقة لتحسين الوثوقية هي تقليل عدد الأعطال. بالإضافة إلى الانقطاعات الطويلة، تُقلّل هذه الطريقة من عدد انخفاضات الفولتية والانقطاعات اللحظية، وتجعل النظام ككل أكثر وثوقية للجمهور العام وشركات الكهرباء . كما يمكن أن تُساعد التحقيقات الميدانية وتحقيقات الأعطال في منع حدوث مواقف مماثلة في المستقبل، ولكن فقط في حال استخلاص الدروس وتنفيذ الإجراءات المناسبة. وهذا أمرٌ بالغ الأهمية لأنّ العديد من الأعطال تتبع أنماطًا ومواقع متشابهة. على سبيل المثال، قد يكون لنوع معين من الموصلات أو العوازل معدل فشل مرتفع، وقد يكون مناسبًا للتنفيذ في ظروف معينة. إذا تمّ تطبيق هذا النوع من الطرق، يمكن اكتشاف المشكلات وتجنّب الانقطاعات الناتجة عنها.

11-13 تحسين حماية أعطال المكونات في شبكة التوزيع

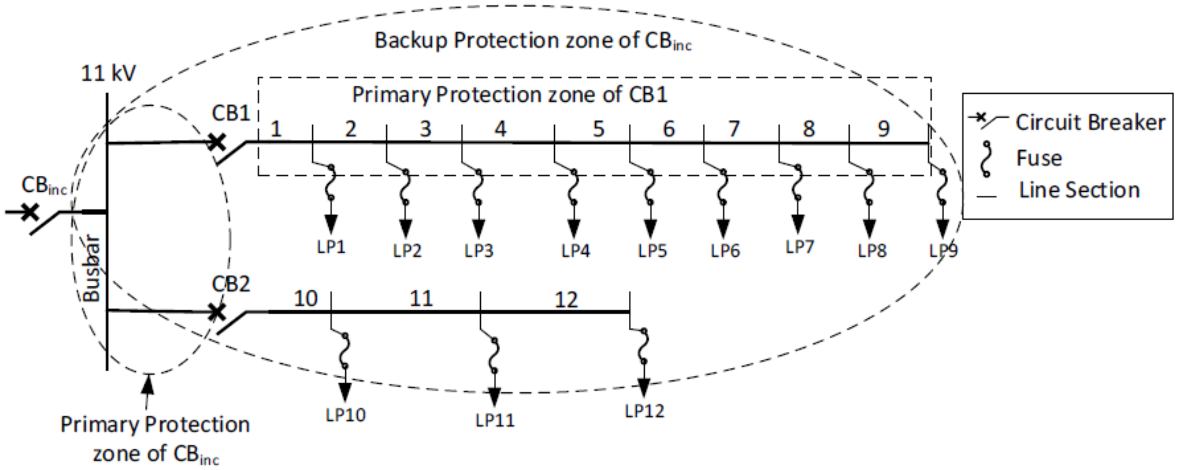
تُجهز شبكات التوزيع بأنظمة حماية لكشف الأعطال داخل الشبكة الناتجة عن أعطال المكونات، وعزل الجزء المعطل عن باقي الشبكة لتقليل آثار العطل. الهدف الرئيسي لنظام الحماية في شبكة التوزيع هو

حماية الأفراد والمعدات من الأعطال والاضطرابات. يجب أن يستجيب نظام الحماية للاضطرابات الطارئة بشكل مناسب ويؤمّن الشبكة في أقصر وقت ممكن. مع الاستخدام الأمثل لنظام الحماية، يمكن تقليل مدة العطل وعدد المستهلكين المتأثرين به . تؤثر فلسفة تشغيل نظام الحماية، وتنسيق الحماية بين مناطق الحماية المختلفة، والعطل الذاتي لمكونات نظام الحماية على وثوقية إمداد الطاقة للمستهلكين، ويجب نمذجتها بشكل مناسب في تقييم وثوقية شبكة التوزيع.

تُستخدم أنواع مختلفة من المعدات في نظام الحماية، مثل قاطع الدائرة الكهربائية، والمصهر، وجهاز إعادة الغلق والتوصيل التلقائي ، وجهاز الفصل، ومانع الصواعق، وغيرها. ومن بين أجهزة الحماية المختلفة، يُعد قاطع الدائرة الكهربائية ذا أهمية خاصة في نمذجة الوثوقية وتقييمها نظرًا لمرونته التشغيلية وإمكانية توسيع نطاق وظائف الحماية المختلفة باستخدام المرحلات.

إن قاطع الدائرة الكهربائية هو جهاز الحماية الذي يفتح الدائرة استجابةً لمرحلات الحماية، ويُغلقها المشغل لإعادة تشغيل الدائرة. ويمكن فتح قاطع الدائرة الكهربائية أو إغلاقه في وقت قصير جدًا. تُصنف قواطع الدائرة الكهربائية وفقًا لآلية إخماد القوس الكهربائي. بالنسبة للأنظمة ثنائية الاتجاه، تُستخدم قواطع الدائرة الكهربائية الهوائية والزيتية والفراغية بناءً على المتطلبات ومستوى الفولتية.

يُزوَّد كل قسم من شبكة التوزيع بمعدات حماية. يُطلق على جهاز الحماية في الخط الأول اسم الحماية الأساسية أو الحماية الرئيسية. يجب أن يكون نظام الحماية قادرًا على التمييز بين العطل وظروف التشغيل العادية، ويجب عزل القسم المعطَّل فقط. في حال فشل الحماية الأساسية في الاستجابة، تعمل الحماية الاحتياطية لعزل العطل. يوضح الشكل 13-4 توضيحًا للحماية الأساسية والاحتياطية. من الشكل، يُلاحظ أن قاطع الدائرة CB1 مسؤول بشكل أساسي عن حماية أقسام الخطوط من 1 إلى 9، وهي منطقة الحماية الأساسية لـ CB1. صُمِّم العطل عند قضيب التوزيع ليتم حمايته بواسطة قاطع التغذية CBinc، وهو منطقة الحماية الأساسية لـ CBinc. في حال حدوث عطل في أي من أقسام الخطوط من L1 إلى L9، وفشل CB1 في العمل، سيفتح قاطع الحماية الاحتياطي CBinc لعزل العطل. لا تعمل الحماية الاحتياطية إلا عند فشل الحماية الأساسية في حماية منطقة الحماية الأساسية من العطل، وهو ما يُضمن من خلال التنسيق السليم للحماية. في الشكل 12-4، جميع نقاط الحمل محمية بواسطة المصهرات. في حال حدوث أي عطل في الجانب السفلي من المصهر، سينصهر وصلة المصهر مما يؤدي إلى انقطاع التيار الكهربائي عند نقطة الحمل المعنية. أما نقاط الحمل السليمة الأخرى فلا تتأثر. ولضمان هذا التشغيل، يجب أن يكون تيار بدء التشغيل للقاطع CB1 أعلى من تيار تشغيل المصهر. وبالمثل، يجب أن يكون تيار بدء التشغيل للقاطع CB1 أقل من تيار بدء التشغيل للقاطع CB1.



الشكل 13-4 حماية نظام التوزيع شعاعي.

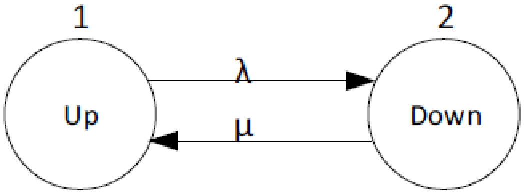
يوضح الشكل 12-4 كذلك عواقب أنواع مختلفة من أعطال قواطع الدائرة. على سبيل المثال، إذا تعرض قاطع الدائرة CB1 لعطل دائرة مفتوحة أو عطل ناتج عن فتح غير مقصود، فإن نقاط التحميل LP1-LP9 تنقطع عنها الكهرباء. مع ذلك، لا يؤثر هذا العطل على نقاط التحميل LP10-LP12. ويمكن استعادة التيار الكهربائي في نقاط التحميل LP1-LP9 بعد إصلاح قاطع الدائرة CB1. وتستمر نقاط التحميل LP1-LP9 في انقطاع التيار حتى يتم إصلاح قاطع الدائرة CB1 وإعادة تركيبه، ويُشار إلى هذه الفترة بزمن إصلاح قاطع الدائرة CB1. في حال تعرض قاطع الدائرة CB1 لعطل دائرة قصر، سيفتح قاطع الدائرة CBinc لعزل العطل. ويؤدي فتح قاطع الدائرة CBinc إلى انقطاع التيار الكهربائي في جميع نقاط التحميل LP1-LP12. ويمكن إغلاق قاطع الدائرة CBinc بعد إزالة قاطع الدائرة CB1 للإصلاح، وبالتالي، لا تعاني نقاط التحميل LP10-LP12 من انقطاع التيار إلا خلال هذه الفترة، والتي تُعرف بزمن التبديل، وهي عادةً أقصر من زمن إصلاح قاطع الدائرة CB1.

لكن نقاط التحميل من LP1 إلى LP9 ستعاني من انقطاع التيار الكهربائي حتى يتم إصلاح قاطع الدائرة CB1 وإعادة تركيبه. في حال تعطل قاطع الدائرة CB1 عند حدوث عطل في أي من أقسام الخطوط من 1 إلى 9، سيعمل نظام CBinc على عزل العطل، مما يؤدي إلى انقطاع التيار الكهربائي عن جميع نقاط التحميل من LP1 إلى LP12. في هذه الحالة، يمكن استعادة التيار الكهربائي إلى نقاط التحميل من LP10 إلى LP12 عن طريق إغلاق نظام CBinc بعد فصل قاطع الدائرة CB1 العالق أو إزالته يدويًا. لذلك، ستشهد نقاط التحميل من LP10 إلى LP12 انقطاعًا في التيار الكهربائي خلال فترة الفصل. مع ذلك، لا يمكن استعادة التيار الكهربائي إلى نقاط التحميل من LP1 إلى LP9 إلا بعد إتمام إصلاح قاطع الدائرة CB1 أو نظام الحماية، وذلك بناءً على سبب تعطل قاطع الدائرة. لذا، ستشهد نقاط التحميل من

LP1 إلى LP9 انقطاعًا في التيار الكهربائي خلال فترة إصلاح قاطع الدائرة CB1. نظرًا لاختلاف نطاق العواقب الناجمة عن أنماط الأعطال المختلفة لقواطع الدائرة، فمن الضروري تطوير نماذج موثوقية تراعي أنماط الأعطال المختلفة.

12-13 نمذجة قواطع الدائرة في تقييم الوثوقية

قد تتعطل مكونات نظام الطاقة نتيجةً لحالات انقطاع الدائرة أو قصرها. لا يؤدي انقطاع الدائرة إلى تشغيل قاطع الدائرة، ويُعرف هذا النوع بالعطل السلبي. أما قصر الدائرة فهو عطل نشط، إذ يؤدي إلى تشغيل قاطع الدائرة. ويُطلق على اجتماع العطل النشط والعطل السلبي معًا اسم العطل الكلي. ويمكن تمثيل معظم مكونات نظام الطاقة بنموذج ماركوف ثنائي الحالة، كما هو موضح في الشكل13-5. تمثل حالة "التشغيل" حالة التشغيل العادية للمكون، والتي تنتقل إلى حالة "الإيقاف" بعد حدوث عطل كامل.



الشكل 13-5 نموذج ماركوف ثنائي الحالة لمكون ما.

مع ذلك، لا يمكن تمثيل قاطع الدائرة الكهربائية بشكل كافٍ بنموذج ماركوف ثنائي الحالة، إذ يمكن أن يتواجد في حالات متعددة نظرًا لوظائف التبديل المتعددة التي يؤديها. يُصمم قاطع الدائرة الكهربائية للعمل إما في وضع الإغلاق الطبيعي (NC) أو وضع الفتح الطبيعي (NO). يمكن تمثيل قواطع الدائرة الكهربائية NC وNO بالحالات التالية :

(أ) إغلاق ناجح عند الطلب.

(ب) فتح ناجح عند الطلب.

(ج) فتح في غير موضعه.

(د) فشل في الإغلاق عند وجوب الإغلاق.

(هـ) تلف أثناء الإغلاق.

(و) عطل أثناء التشغيل (ماس كهربائي).

(ز) فشل في الفتح عند الطلب.

(ح) عطل أثناء الفتح.

(ط) تلف أثناء الفتح بنجاح.

(ي) عطل أثناء الاختبار أو الصيانة.

(ك) تلف تم اكتشافه أثناء الاختبار.

الحالتان (أ) و(ب) حالتان ناجحتان لقاطع الدائرة المفتوح عادةً (NO) والمغلق عادةً (NC)، على التوالي. هاتان الحالتان هما المهام المصممة لقاطع الدائرة. مع ذلك، يمكن لقاطع الدائرة الانتقال إلى أي من الحالات بين (ج) إلى (ك)، وجميعها حالات فشل. كل حالة فشل فريدة، ولكل حالة تأثير مختلف على تشغيل نظام التوزيع. يمكن أن تحدث الحالة (ج) لقاطع الدائرة المغلق عادةً (NC) المعرض لعطل سلبي،وتؤثر على المغذي أو جزء نظام التوزيع المتصل به. من وجهة نظر الموثوقية، يؤثر فشل الحالة (ج) فقط على نقاط التحميل المتصلة بالمغذي المحمي بواسطة قاطع الدائرة المعطل . وبالمثل، تحدث الحالتان (د) و(هـ) مع قاطع الدائرة المفتوح عادةً (NO)، وتؤثر على نقاط التحميل أعلى أسفل

والتي صُممت للتغذية من قاطع الدائرة هذا. الحالة (و) لقاطع الدائرة هي حالة عطل نشط، ويمكن أن تحدث مع كل من قواطع الدائرة المفتوحة عادةً (NO) والمغلقة عادةً (NC). يتم حماية هذا النوع من الأعطال بواسطة تشغيل قاطع الدائرة الاحتياطي (أو قواطع الدائرة الاحتياطية)، مما يؤدي إلى تعطل العديد من القواطع السليمة المحمية بواسطة قاطع الدائرة الاحتياطي .عمليًا، غالبًا ما يكون هذا هو قاطع الدائرة الداخل إلى المحطة الفرعية. يؤثر هذا النوع من الأعطال بشدة على موثوقية عدد كبير من نقاط التحميل. تُسمى حالات العطل (ز) - (ط) مجتمعةً بحالات تعطل قاطع الدائرة، والتي تحدث مع قواطع الدائرة المغلقة عادةً (NC). تتشابه تبعات موثوقية حالة تعطل قاطع الدائرة مع تبعات العطل النشط لقواطع الدائرة عندما يحدث العطل في جزء الشبكة المحمي بواسطة قاطع الدائرة المتعطل. تحدث الحالتان (ي) و(ك) خلال مرحلة الصيانة والاختبار، وبالتالي لا تحدث انقطاعات إضافية لنقطة التحميل بخلاف انقطاعات الصيانة. يؤدي انتقال الحالات من حالة ناجحة إلى أي من حالات العطل إلى انقطاع التيار الكهربائي عن نقطة التحميل. من الضروري تحديد أي من حالات قاطع الدائرة في الشبكة تُسهم في حدوث عطل عند نقاط التحميل.

13-13 مفهوم تماسك الموثوقية **Concept of Reliability Coherence**

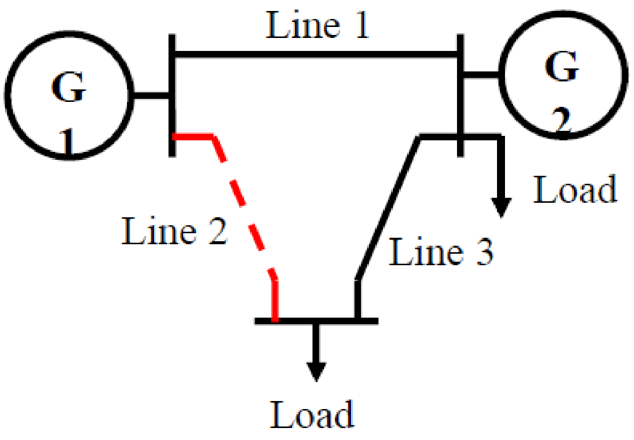
إذا تعطل النظام مع وجود بعض المكونات السليمة وبعض المكونات المعطلة، ففي نظام متماسك الوثوقية، لن يؤدي تعطل مكون سليم إلى نجاح النظام. وإذا كان النظام في حالة نجاح مع وجود بعض

المكونات السليمة وبعض المكونات المعطلة، ففي نظام متماسك الوثوقية، لن يؤدي إصلاح/ استعادة مكون معطل إلى تعطل النظام.

حالة النظام:	المكونات المعطلة	المكونات السليمة
نجاح	إصلاح هذه المكونات لن يؤدي إلى تعطل النظام	----
فشل	----	لن يؤدي تعطل هذه المكونات إلى نجاح النظام

مثال 31-1:

وضح تماسك الوثوقية للنظام المبين في الشكل 13-6 .



الشكل 13-6 .

الحل:

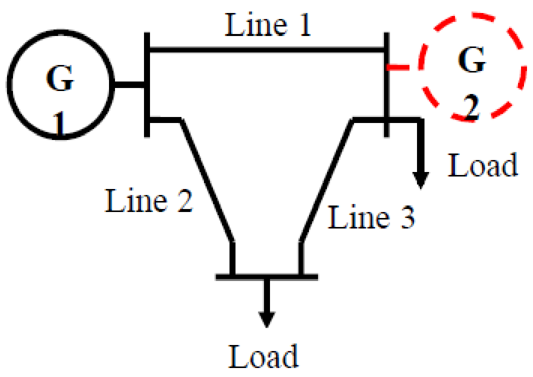
الحالة المفترضة حالة النظام	المكونات المعطلة	المكونات السليمة
المكونات الناجحة	الخط 2	G1، G2، الخط 1 والخط 3

النتيجة :

- تماسك الوثوقية: لن يؤدي إصلاح الخط 2 إلى تعطل النظام.

مثال 13- 2:

وضح تماسك الوثوقية للنظام المبين في الشكل 13-7 .



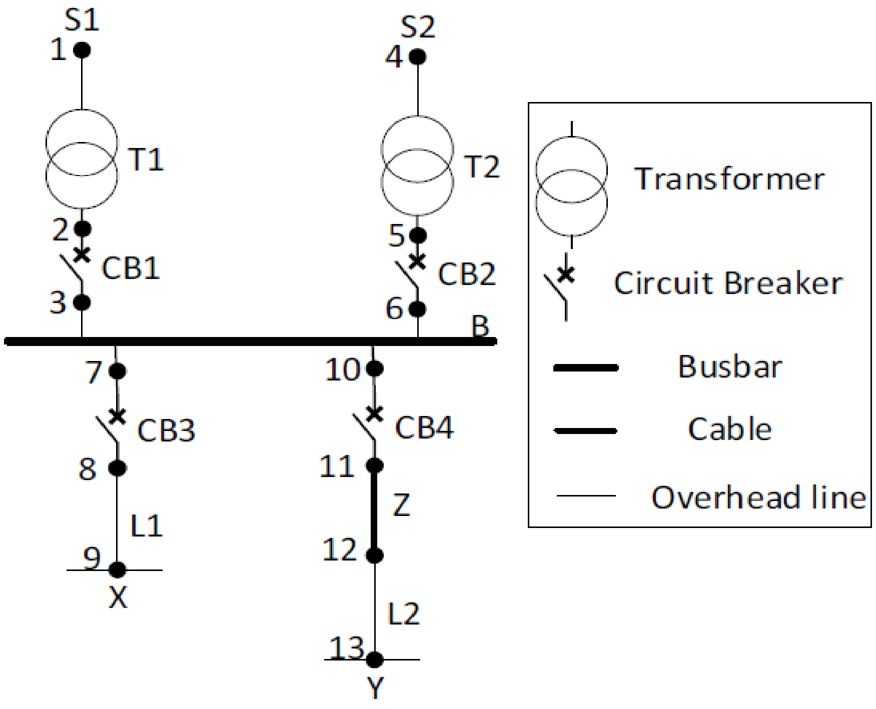
الشكل 13-7 .

الحل :

الحالة المفترضة: حالة النظام	المكونات المعطلة	المكونات السليمة
المكونات الناجحة	G2	G1، الخط 1 والخط 2 والخط 3

النتيجة :

- تماسك الوثوقية: لن يؤدي تعطل الخط 2 إلى نجاح النظام. كما موضح في الشكل 13-8.



الشكل 13-8.

الملاحق - اسئلة في الوثوقية

الملحق -1 تقييم وثوقية نظام توليد الطاقة الكهربائية

الجزء أ ـــ أسئلة ذات إجابات قصيرة

1. عرّف وثوقية نظام القدرة الكهربائية وميّز بين مفهومي الكفاية (Adequacy) والوثوقية التشغيلية / الأمان (Security).
2. ما هو جدول احتمالية انقطاع قدرة التوليد (COPT)؟
3. عرّف احتمالية فقدان الحمل (LOLP) والقيمة المتوقعة للطاقة المفقودة (LOEE).
4. اشرح أهمية معدل الانقطاع القسري (FOR) في وثوقية نظام التوليد.
5. اشتق النموذج ثنائي الحالة (two-state model) لوحدة التوليد.
6. ما المقصود باحتمالية انقطاع القدرة (COP)؟
7. اشرح مفهوم القدرة المكافئة لتحمّل الحمل (ELCC).
8. عرّف الطاقة المتوقع عدم توفيرها (EENS).
9. ما الفرق بين LOLP و LOLE؟
10. اشرح كيف تؤثر معدلات تعطل وإصلاح وحدات التوليد على وثوقية النظام.
11. ما هو نموذج ماركوف (Markov model) وكيف يُطبّق في دراسة وثوقية نظام التوليد؟
12. اذكر الافتراضات التي تُتخذ عادةً عند إعداد جدول احتمالية انقطاع قدرة التوليد (COPT).
13. اشرح مفهوم الاحتياطي الدوّار (spinning reserve) وعلاقته بالوثوقية.
14. ما المقصود بمعيار الوثوقية الذي ينص على "يوم واحد كل 10 سنوات"؟
15. اشرح أهمية منحنيات مدة الحمل (load duration curves) في تقييم وثوقية نظام التوليد.

الجزء ب ـــ مسائل حسابية

16. نظام توليد مكون من وحدتين

تتكون محطة توليد من وحدتي توليد بقدرة اسمية تبلغ 50 ميجاوات و30 ميجاوات. وتبلغ معدلات الانقطاع القسري (forced outage rates) لكل منهما 0.05 و0.10 على التوالي.

أ) قم بإعداد جدول احتمالات انقطاع القدرة (COPT).

ب) حدد احتمال كل حالة ممكنة من حالات انقطاع القدرة.

ج) إذا كان الحمل الأقصى (peak load) يساوي 70 ميجاوات، فحدد احتمال فقدان الحمل (LOLP) بافتراض وجود حمل ثابت قدره 70 ميجاوات.

17. نظام مكون من ثلاث وحدات

يتكون نظام التوليد من ثلاث وحدات متماثلة، قدرة كل منها 25 ميجاوات، ومعدل انقطاع قسري قدره 0.08.

أ) قم بإعداد جدول احتمالات قدرة التوليد المتاحة (COPT) باستخدام التوزيع ذي الحدين (الطريقة الثنائية).

ب) احسب احتمالية عدم توفر قدرة توليد تبلغ 50 ميجاوات أو أكثر.

ج) إذا كان الحمل الأقصى للنظام يبلغ 60 ميجاوات، فاحسب احتمالية عدم كفاية التوليد.

18. محطة توليد طاقة رباعية الوحدات

تحتوي المحطة على أربع وحدات توليد طاقة بقدرات 20 ميغاواط، و20 ميغاواط، و30 ميغاواط، و40 ميغاواط، وتبلغ نسبة الانقطاع القسري (FORs) 0.05، و0.05، و0.08، و0.10 على التوالي.

أنشئ جدول التحسين الأمثل (COPT) الكامل باستخدام الطريقة التكرارية.

19. حساب مؤشر LOLE

يبلغ إجمالي القدرة المركبة لنظام توليد الطاقة 500 ميجاوات، في حين يبلغ الحمل الأقصى السنوي 450 ميجاوات. باستخدام جدول احتمالات القدرة المتاحة (COPT) المناسب، حدد "توقع فقدان الحمل" (LOLE) إذا كان احتمال انخفاض قدرة التوليد عن الحمل المطلوب يساوي 0.004 في كل يوم من أيام السنة.

20. منحنى مدة الحمل

يتميز نظام القدرة الكهربائية بمستويات الحمل التالية:

الحمل (ميغاواط)	المدة (ساعة/ سنة)
100	1,000
80	2,000
60	3,000
40	2,760

يتكون نظام التوليد من وحدتين بقدرة 60 ميجاوات لكل منهما، وتبلغ نسبة الانقطاع القسري (FOR) لكل وحدة 0.05.

أ) قم بإنشاء جدول احتمالات سعة النظام (COPT).

ب) حدد مؤشر احتمالية فقدان الحمل (LOLE).

ج) احسب الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS).

الجزء ج ـــ أسئلة تتطلب إجابات مفصلة

21. اشرح بالتفصيل المنهجية المستخدمة لتقييم وثوقية نظام توليد الطاقة الكهربائية، مع توضيح أدوار كل من : معدل الانقطاع القسري (FOR)، وجدول احتمالات انقطاع القدرة (COPT)، وتوقع فقدان الطاقة (LOLE)، واحتمالية فقدان الحمل (LOLP)، والطاقة غير المجهزة المتوقعة (EENS).

22. اشتق الخوارزمية التكرارية (العودية) لبناء جدول احتمالات انقطاع القدرة (COPT)، ووضّح كيفية تطبيقها على نظام توليد مكون من ثلاث وحدات.

23. اشرح نهج "ماركوف" (Markov approach) في تقييم وثوقية نظام التوليد. اشتق احتمالات الانتقال لوحدة توليد ذات حالتين، وناقش كيفية تعميم هذا النهج ليشمل وحدات متعددة.

24. ناقش طريقة "احتمالية فقدان الحمل" (LOLP) لتقييم وثوقية نظام التوليد، واشرح كيفية دمج "منحنى مدة الحمل" (load-duration curve) في عملية الحساب.

25. يحتوي نظام التوليد على عدة وحدات توليد تقليدية ذات قدرات ومعدلات انقطاع قسري (forced outage rates) متفاوتة. ضع إجراءً متكاملاً لحساب كل من مؤشر "توقع فقدان الحمل" (LOLE) ومؤشر "الطاقة غير المجهزة المتوقعة" (EENS) باستخدام جدول احتمالات قدرة النظام المتاحة (COPT) ومنحنى مدة الحمل (load-duration curve).

26. ناقش مزايا ومحددات مؤشرات الوثوقية التالية:

- احتمالية فقدان الحمل (LOLP)
- توقع فقدان الحمل (LOLE)
- الطاقة غير المجهزة المتوقعة (LOEE/EENS)
- تكرارية فقدان الحمل (LOLF)

27. اشرح تأثير إضافة قدرة توليد جديدة على وثوقية النظام. وناقش مفاهيم: هامش الاحتياطي (Reserve margin)، ومساهمة القدرة (Capacity credit)، والقدرة الفعالة لتحمل الحمل (Effective load carrying capability).

28. قارن بين الأساليب الحتمية (Deterministic) والاحتمالية (Probabilistic) لتقييم وثوقية نظام التوليد، مع تقديم أمثلة مناسبة لكل أسلوب.

29. اشرح كيف تؤثر مصادر الطاقة المتجددة - ولا سيما طاقة الرياح والطاقة الشمسية - على تقييم وثوقية أنظمة التوليد التقليدية. وناقش مفهومي "مساهمة القدرة" (Capacity credit) و"النمذجة الاحتمالية" (Probabilistic modelling).

30. تخطط إحدى شركات الكهرباء لإضافة وحدة توليد جديدة بقدرة 100 ميجاوات إلى نظام قائم. اشرح كيف ستقوم بتقييم ما إذا كانت الوحدة الجديدة تلبي معيار الوثوقية المتمثل في أن يكون مؤشر (LOLE) أقل من أو يساوي 0.1 يوم/ سنة، مع وصف الحسابات والافتراضات المطلوبة.

الجزء د ـــ سؤال متقدم

31. مسألة شاملة

يتكون نظام التوليد من الوحدات التالية:

معدل الانقطاع القسري	القدرة	الوحدة
0.04	50 ميجاوات	G1
0.06	50 ميجاوات	G2
0.08	100 ميجاوات	G3
0.10	100 ميجاوات	G4

يمكن تقريب منحنى مدة الحمل السنوي بالقيم التالية:

ساعة/سنة	الحمل (ميجاوات)
100	250
500	220
1,000	200
2,000	180
3,000	150
2,160	120

المطلوب:

أ) إنشاء جدول احتمالات سعة التوليد المتاحة (COPT) الكامل لنظام التوليد.

ب) تحديد احتمالية فقدان الحمل (LOLP) المقابلة لكل مستوى من مستويات الحمل.

ج) حساب التوقع السنوي لفقدان الحمل (LOLE) بوحدة ساعة/سنة.

د) حساب الطاقة المتوقع عدم تزويدها (EENS/LOEE) بوحدة ميجاوات-ساعة/سنة.

هـ) تحديد ما إذا كان النظام يحقق معيار الوثوقية البالغ 0.1 يوم/ سنة.

و) مناقشة كيفية تغير مؤشرات الوثوقية في حال تركيب وحدة إضافية بقدرة 50 ميجاوات ومعدل انقطاع قسري (FOR) يساوي 0.05.

الملحق -2 تقييم وثوقية نظام نقل الطاقة الكهربائية

الجزء أ: أسئلة تتطلب إجابات قصيرة

1. عرّف وثوقية نظام النقل، وميّز بين مفهومي "الكفاية" (Adequacy) و"الأمان" (Security).
2. ما هي المكونات الرئيسية لنموذج وثوقية نظام النقل؟
3. عرّف معدل الفشل ومعدل الإصلاح لخط النقل.
4. اشرح الفرق بين تكوينات الوثوقية على التوالي وعلى التوازي.
5. ما المقصود بانقطاع خط النقل؟
6. عرّف معدل الانقطاع القسري (FOR) واشرح أهميته في وثوقية النقل.
7. ما المقصود بـ "الحالة الطارئة" (Contingency) في نظام نقل الطاقة؟
8. اشرح معنى معيار الوثوقية (N−1).
9. ما هي الحالة الطارئة من النوع (N−2)؟
10. عرّف احتمالية فقدان الحمل (LOLP) في سياق شبكة النقل.
11. ما المقصود بالطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS)؟
12. اشرح مفهوم الفشل الناجم عن سبب مشترك (Common-cause failure) في أنظمة النقل.
13. ما هي مجموعة القطع الدنيا (Minimal cut set)؟
14. اشرح استخدام نماذج ماركوف (Markov models) في تقييم وثوقية نظام النقل.
15. ما الغرض من دراسة تدفق الحمل (Load-flow study) في تقييم وثوقية النقل؟
16. اشرح العلاقة بين الحدود الحرارية وحدود الجهد ووثوقية النقل.
17. ما المقصود بحالات النظام في التحليل الاحتمالي لوثوقية النقل؟
18. عرّف مفهومي التوافرية (Availability) وعدم التوافرية (Unavailability) لمكون من مكونات النقل.
19. ما هو مؤشر الوثوقية؟ واذكر ثلاثة أمثلة تُستخدم لأنظمة النقل.

20. اشرح سبب تأثير الظروف الجوية على وثوقية نظام النقل.

الجزء ب: أسئلة وصفية/ نظرية

21. اشرح الإجراء الأساسي لتقييم وثوقية نظام نقل اقدرة الكهربائية.

يجب أن تتضمن إجابتك ما يلي:

- تمثيل النظام
- بيانات وثوقية المكونات
- حصر حالات الطوارئ (الاحتمالات الطارئة)
- تحليل تدفق الحمل (سريان القدرة)
- تحديد حالات فشل النظام
- مؤشرات الوثوقية
- تفسير النتائج

22. ناقش معيار "N–1" المتعلق بوثوقية نظام النقل.

اشرح ما يلي:

- مفهوم المعيار
- تطبيقه على خطوط النقل والمحولات
- مزاياه
- حدوده (أوجه القصور فيه)
- الحالات التي قد لا يكون فيها معيار "N–1" كافياً

23. اشرح النهج الاحتمالي لتقييم وثوقية نظام النقل.

ناقش كيفية دمج احتمالات تعطل المكونات مع حالات تشغيل الشبكة لتحديد وثوقية النظام.

24. صِف دور تحليل تدفق الأحمال في تقييم وثوقية نظام النقل.

اشرح كيف يمكن أن يؤدي انقطاع خط النقل إلى:

- تحميل زائد على الخط
- تجاوز حدود الفولتية المسموح بها
- انقطاع التغذية
- انفصال الشبكة
- أعطال متسلسلة (متتابعة)

25. اشرح مفهوم تحليل الحالات الطارئة (contingency analysis) وتطبيقه في تقييم وثوقية شبكات النقل.

قارن بين:

- تحليل الحالة الأساسية (Base-case analysis)
- انقطاع خط واحد
- خروج مولد عن الخدمة
- خروج محول عن الخدمة
- تحليل الحالات الطارئة المتعددة

26. ناقش طريقة "مجموعة القطع الصغرى " (Minimal-cut-set method) لتقييم وثوقية أنظمة النقل. اشرح كيفية تحديد مجموعات القطع الصغرى وكيفية استخدامها لحساب احتمالية فشل النظام.

27. قارن بين الطرق الحتمية (Deterministic) والطرق الاحتمالية (Probabilistic) لتقييم وثوقية شبكات النقل. ناقش مزايا وعيوب كل طريقة.

28. اشرح كيف يمكن استخدام محاكاة "مونت كارلو" لتقييم موثوقية نظام النقل. يجب أن يتضمن الشرح ما يلي:

1. التوليد العشوائي لحالات المكونات
2. تشكيل حالة الشبكة
3. حل مسألة تدفق الحمل (Load-flow solution)
4. تحديد حالات الفشل

5. التقدير الإحصائي لمؤشرات الموثوقية.

الجزء ج: أسئلة اختبارية ذات طابع عددي

29. نظام نقل ثنائي الخطوط يقوم تغذية حمل كهربائي عبر خطي نقل متصلين على التوازي. يبلغ معدل الانقطاع القسري السنوي لكل خط 0.05.

أ) حدد احتمال أن يكون كلا الخطين متاحين للعمل.

ب) حدد احتمال أن يكون خط واحد فقط غير متاح للعمل.

ج) حدد احتمال أن يكون كلا الخطين غير متاحين للعمل.

د) احسب مدى توافر (جاهزية) نظام النقل.

30. نظام نقل على التوالي

تتصل ثلاثة خطوط نقل على التوالي بين محطة توليد ومركز أحمال. وتبلغ احتمالات تعطلها السنوية 0.02 و0.03 و0.04 على التوالي.

بافتراض استقلالية حالات التعطل:

أ) احسب احتمال أن تكون الخطوط الثلاثة جميعها متاحة للعمل.

ب) احسب احتمال تعطل مسار النقل.

ج) حدد وثوقية النظام.

31. شبكة نقل مكونة من أربعة خطوط

تتكون شبكة نقل من أربعة خطوط ذات احتمالات الفشل التالية:

الخط	احتمال الفشل
L1	0.02
L2	0.03
L3	0.04
L4	0.05

بافتراض أن حالات الانقطاع مستقلة عن بعضها البعض:

أ) حدد احتمال عدم حدوث أي انقطاع.

ب) حدد احتمال حدوث انقطاع واحد بالضبط.

ج) حدد احتمال حدوث انقطاعين أو أكثر في آن واحد.

32. وثوقية خط النقل

يبلغ معدل الأعطال لخط نقل فولتية 132 كيلوفولت 0.08 عطل/ سنة، ومتوسط زمن الإصلاح 12 ساعة. احسب:

أ) متوسط المدة السنوية لانقطاع الخدمة.

ب) توافرية الخط.

ج) عدم توافرية الخط.

د) العدد المتوقع لساعات عدم توافر الخط في السنة.

33. تحليل الطوارئ وفق معيار (N−1)

يتكون نظام النقل من خمسة خطوط. وفي ظل ظروف التشغيل العادية، يعمل النظام ضمن جميع الحدود الحرارية المسموح بها. تم الحصول على النتائج التالية من تحليل الطوارئ:

حالة الانقطاع	أقصى حمل على الخط	الحمل المُغذّى
انقطاع الخط L1	%115	%100
انقطاع الخط L2	%92	%100
انقطاع الخط L3	%105	%98
انقطاع الخط L4	%88	%100
انقطاع الخط L5	%96	%100

أ) حدد حالات الطوارئ التي تخالف معيار (N−1).

ب) حدد حالة الطوارئ التي تتسبب في أكبر قدر من فقدان الحمل.

ج) اشرح الإجراءات التصحيحية الممكنة.

الجزء د: مسائل عددية متقدمة

34. مسألة وثوقية النقل في نظام مكون من ثلاث قضبان توزيع (Buses)

لننظر في نظام مكون من ثلاثة قضبان توزيع يتألف من:

- قضيب توزيع 1: مولد = 100 ميجاوات
- قضيب توزيع 2: حمل = 60 ميجاوات
- قضيب توزيع 3: حمل = 40 ميجاوات

تتصل قضبان التوزيع هذه عبر ثلاثة خطوط نقل:

الخط	من–إلى	السعة	معدل الانقطاع القسري (FOR)
L1	2–1	80 ميجاوات	0.05
L2	3–1	60 ميجاوات	0.04
L3	3–2	40 ميجاوات	0.03

افترض أن أعطال الخطوط مستقلة عن بعضها البعض. المطلوب:

أ) حصر جميع حالات انقطاع خط واحد.

ب) تحديد سعة النقل المتاحة لكل حالة.

ج) تحديد الحالات التي لا يمكن فيها تلبية الحمل بالكامل.

د) حساب احتمالية حدوث كل حالة.

هـ) تحديد احتمالية فشل نظام النقل.

35. حساب مؤشر الوثوقية

يتم تقييم نظام نقل للطاقة على مدار عام واحد، حيث تحدث حالات الانقطاع التالية:

الحدث Event	التكرارية (حدث/ سنة) Frequency (events/year)	المدة (ساعة/ حدث) Duration (hours/event)	الحمل المفصول (ميجاواط) Load interrupted (MW)
عطل الخط L1	0.20	5	20
عطل الخط L2	0.10	8	30
عطل المحوّل	0.05	20	50

احسب ما يلي:

أ) إجمالي تكرارية الانقطاع.

ب) إجمالي مدة الانقطاع.

ج) الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS).

د) متوسط مدة الانقطاع.

هـ) ناقش أداء النظام من حيث الوثوقية.

36. مسألة مجموعة القطع الدنيا (Minimal cut-set problem)

يمكن لمركز الأحمال استقبال الطاقة عبر ثلاثة مسارات للنقل:

- المسار A: L1–L2
- المسار B: L3–L4
- المسار C: L5

بافتراض أن الخطوط تتعطل بشكل مستقل باحتمالات قدرها:

- L1 = 0.02
- L2 = 0.03

- L3 = 0.04
- L4 = 0.05
- L5 = 0.01

أ) حدد مجموعات القطع الصغرى (الدنيا).

ب) حدد احتمال تعطل كل مسار من مسارات النقل.

ج) حدد احتمال فقدان مركز الأحمال لجميع مصادر إمداد الطاقة عبر مسارات النقل.

د) اذكر الافتراضات المستخدمة في حساباتك.

الملحق-3 تقييم وثوقية نظام توزيع الكهرباء

الجزء أ — أسئلة تتطلب إجابات موجزة

1. عرّف وثوقية نظام التوزيع.
2. ميّز بين كفاية نظام التوزيع وأمن النظام.
3. ما هي الأسباب الرئيسية للأعطال في أنظمة توزيع الكهرباء؟
4. عرّف معدل الفشل (العطل) ومعدل الإصلاح.
5. ما المقصود بـ "توافرية المكون" (component availability)؟
6. عرّف مؤشر متوسط تكرار انقطاع الخدمة في النظام (SAIFI).
7. عرّف مؤشر متوسط مدة انقطاع الخدمة في النظام (SAIDI).
8. عرّف مؤشر متوسط مدة انقطاع الخدمة للمشترك (CAIDI).
9. ما هو مؤشر متوسط توافرية الخدمة (ASAI)؟
10. اشرح الفرق بين الانقطاعات اللحظية والانقطاعات المستمرة.
11. ما هو نظام التوزيع الشعاعي (Radial Distribution System)؟
12. اشرح خصائص الوثوقية لمغذّي توزيع شعاعي.

13. ما هو نظام التوزيع الشبكي (Meshed Distribution System)؟

14. اشرح مفهوم مفتاح الربط (tie switch) في سياق وثوقية نظام التوزيع.

15. ما المقصود بتقسيم مغذّي التوزيع إلى قطاعات (sectionalizing)؟

16. عرّف الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS).

17. اشرح مفهوم تكلفة انقطاع الخدمة بالنسبة للمشترك.

18. ما هي "مجموعة القطع الصغرى (الدنيا) " (minimal cut set) في شبكة التوزيع؟

19. اشرح الفرق بين مؤشرات الوثوقية عند نقطة الحمل ومؤشرات الوثوقية للنظام ككل.

20. ما الغرض من تركيب أجهزة إعادة الإغلاق الآلي (automatic reclosers) في نظام التوزيع؟

الجزء ب — أسئلة نظرية ووصفية

21. اشرح الإجراء الأساسي لتقييم وثوقية نظام توزيع الطاقة الكهربائية.

ناقش ما يلي:

- هيكلية نظام التوزيع
- معدلات تعطل المكونات
- أوقات الإصلاح
- نقاط الأحمال
- أنماط الأعطال
- إجراءات استعادة الخدمة
- مؤشرات الوثوقية

22. اشرح كيفية تقييم الوثوقية في نظام توزيع شعاعي (Radial Distribution System).

ناقش تأثير تعطل أي مكوّن من مكوّنات خط التغذية على المشتركين الواقعين بعد نقطة العطل (المشتركين في المراحل اللاحقة).

23. قارن بين أنظمة التوزيع الشعاعية (Radial)، والحلقية (Ring)، والشبكية (Meshed) من حيث الوثوقية. يجب أن تتناول إجابتك الجوانب التالية:

- استمرارية التغذية
- مسارات التغذية البديلة
- الحماية
- زمن استعادة الخدمة
- التكلفة
- مؤشرات الموثوقية

24. اشرح مؤشرات الوثوقية التالية لأنظمة التوزيع:

- SAIFI
- SAIDI
- CAIDI
- ASAI
- EENS

وضّح المعنى الفيزيائي لكل مؤشر وكيفية حسابه.

25. اشرح تأثير مفاتيح التقسيم (Sectionalizing switches) على وثوقية نظام التوزيع.

ناقش كيف يمكن لعملية التقسيم أن تقلل من:

- عدد المشتركين المتأثرين
- مدة الانقطاع
- الطاقة غير المجهزة (المفقودة)

26. اشرح دور أجهزة إعادة الإغلاق الآلي (Automatic reclosers) في تحسين وثوقية نظام التوزيع.

ناقش الأعطال المؤقتة، والأعطال الدائمة، وتنسيق الحماية، ومدة الانقطاع.

27. صِف طريقة "مجموعة القطع الصغرى (الدنيا) " (Minimal-cut-set method) لتقييم وثوقية نظام التوزيع.

اشرح كيفية تحديد مجموعات القطع الدنيا في مغذٍ شعاعي (Radial feeder).

28. ناقش تأثير التوليد الموزع (DG) على وثوقية نظام التوزيع. مع مراعاة الجوانب التالية:

- التشغيل المستقل (الجزرية/Islanding)
- مصدر التغذية البديل
- تنسيق الحماية
- المساهمة في تيار العطل
- استعادة الخدمة
- الشبكات المصغرة (Microgrids)

الجزء ج — أسئلة حسابية

29. وثوقية مغذٍ كهربائي أحادي يُغذّي خط توزيع شعاعي (Radial feeder) مئة مشترك. يتكون الخط من ثلاثة أقسام بالبيانات التالية:

القسم	معدل الأعطال (أعطال/سنة)	زمن الإصلاح (ساعات)
1	0.10	5
2	0.08	6
3	0.05	4

افترض أن تعطل أي قسم يؤدي إلى انقطاع الخدمة عن جميع المشتركين الواقعين بعد ذلك القسم (في اتجاه التغذية). احسب:

أ) التكرار السنوي للانقطاع لكل نقطة حمل.

ب) المدة السنوية لانقطاع الخدمة لكل نقطة حمل.

ج) متوسط مدة الانقطاع لكل نقطة حمل.

30. حساب مؤشري SAIFI و SAIDI

تقوم شركة لتوزيع الكهرباء بتزويد 1000 مشترك بالخدمة. وخلال عام واحد، حدثت حالات انقطاع التيار التالية:

الحدث	عدد المشتركين المتأثرين	مدة الانقطاع
العطل 1	200	ساعتان
العطل 2	500	ساعة واحدة
العطل 3	100	4 ساعات
العطل 4	300	3 ساعات

احسب ما يلي:

أ) SAIFI

ب) SAIDI

ج) CAIDI

31. وثوقية مغذي التوزيع

يُغذي مغذي شعاعي ثلاث نقاط حمل. بيانات الوثوقية هي كالتالي:

المكون |	معدل الفشل (أعطال/ سنة)	زمن الإصلاح (ساعات)
قسم المغذي A	0.08	5
قسم المغذي B	0.06	6
قسم المغذي C	0.04	8

تم ترتيب نقاط الحمل على النحو التالي:

محطة التوزيع الفرعية ← C ← B ← A

حدد تكرار الانقطاع ومدة الانقطاع السنوية لكل نقطة حمل.

32. الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS): يحتوي مغذي توزيع على ثلاث نقاط أحمال:

نقطة الحمل	الحمل	معدل الأعطال	زمن الإصلاح
LP1	2 ميجاوات	0.05/سنة	5 ساعات
LP2	3 ميجاوات	0.04/سنة	6 ساعات
LP3	1.5 ميجاوات	0.03/سنة	8 ساعات

بافتراض أن الأعطال مستقلة عن بعضها البعض، احسب الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS) بوحدة ميجاوات-ساعة/سنة.

33. تكلفة انقطاع الخدمة عن المشتركين

يضم نظام التوزيع مجموعات المشتركين التالية:

نوع المشترك	عدد المشتركين	متوسط تكلفة الانقطاع
سكني	500	6 دولار / مشترك-ساعة
تجاري	100	30 دولار/ مشترك-ساعة
صناعي	20	150 دولار / مشترك-ساعة

إذا أدى عطل في المغذي إلى انقطاع الخدمة عن جميع المشتركين لمدة ساعتين، فاحسب ما يلي:

أ) إجمالي تكلفة انقطاع الخدمة عن المشتركين.

ب) متوسط تكلفة الانقطاع لكل مشترك.

ج) ناقش كيف يمكن تبرير الاستثمار في تحسين الموثوقية باستخدام تحليل تكلفة الانقطاع.

الجزء د ــــ مسائل عددية متقدمة

34. وثوقية نظام التوزيع الشعاعي

لننظر في خط التغذية الشعاعي التالي:

محطة ثانوية ← القسم 1 ← القسم 2 ← القسم 3 ← القسم 4

يغذي هذا الخط أربع نقاط أحمال:

- LP1 بعد القسم 1

- LP2 بعد القسم 2
- LP3 بعد القسم 3
- LP4 بعد القسم 4

بيانات المكونات هي كالتالي:

القسم	معدل الأعطال/ سنة	زمن الإصلاح
S1	0.06	4 ساعات
S2	0.08	5 ساعات
S3	0.05	6 ساعات
S4	0.04	8 ساعات

احسب لكل نقطة حمل ما يلي:

أ) تكرارية الأعطال.

ب) المدة السنوية لانقطاع الخدمة.

ج) متوسط مدة انقطاع الخدمة.

د) SAIFI.

هـ) SAIDI.

و) CAIDI.

35. تأثير استخدام مفاتيح التقسيم (Sectionalizing)

يغذي خط تغذية شعاعي (radial feeder) أربع نقاط أحمال. في البداية، لا يوجد مفتاح تقسيم.

يتم تركيب مفتاح تقسيم بين نقطتي الحمل LP2 و LP3.

معدلات تعطل مكونات خط التغذية هي كالتالي:

المكون	معدل التعطل/ سنة	زمن الإصلاح- ساعة
S1	0.10 |	6
S2	0.08	5
S3	0.06	8

افترض أن المفتاح قادر على عزل القسم الذي حدث فيه العطل وإعادة التغذية للمشتركين غير المتأثرين (الواقعين بعد نقطة العطل) في غضون ساعة واحدة. المطلوب:

أ) حساب مؤشرات الوثوقية قبل تركيب المفتاح.

ب) حساب المؤشرات بعد تركيب المفتاح.

ج) تحديد نسبة التحسن في مؤشر SAIDI.

د) شرح سبب تحسين عملية التقسيم للموثوقية.

36. نظام التوزيع الحلقي

تتكون شبكة التوزيع من أربع نقاط حمل متصلة على شكل حلقة:

$$S \rightarrow LP1 \rightarrow LP2 \rightarrow LP3 \rightarrow LP4 \rightarrow S$$

يبلغ معدل الأعطال لكل قسم من أقسام الخط 0.05 عطل/ سنة، وزمن الإصلاح 5 ساعات.

افترض أنه يمكن تشغيل الحلقة كشبكة شعاعية (Radial network) وأنه يمكن استعادة التغذية عبر المسار البديل بعد عزل العطل.

احسب ما يلي:

أ) وثوقية كل نقطة حمل دون استخدام التبديل (Switching).

ب) المدة المتوقعة لانقطاع الخدمة مع وجود نظام تبديل آلي.

ج) ناقش التحسن في الوثوقية مقارنةً بالنظام الشعاعي البحت.

الملحق-4 اسئلة حول طرق تحسين الوثوقية

الجزء هـ - أسئلة حول تحسين الوثوقية

37. يعاني مغذٍّ شعاعي للتوزيع الكهربائي من انقطاعات متكررة.

ناقش خمس طرق عملية لتحسين موثوقيته.

يمكن أن تتضمن إجابتك ما يلي:

- التقسيم (إلى قطاعات)
- أجهزة إعادة الإغلاق الآلي
- المغذيات البديلة
- التوليد الموزع
- الصيانة الوقائية
- الكيبلات الأرضية
- المفاتيح التي يتم التحكم فيها عن بُعد
- المحولات الاحتياطية

38. اشرح كيف يمكن للأتمتة وتقنية الشبكات الذكية تحسين وثوقية نظام التوزيع.

ناقش ما يلي:

- نظام سكادا (SCADA)
- الكشف الآلي عن الأعطال
- تحديد موقع العطل
- العزل
- استعادة الخدمة
- التبديل عن بُعد
- الشبكات ذاتية الإصلاح

39. ناقش تأثير تحويل خطوط التوزيع الهوائية إلى خطوط أرضية (تحت الأرض) على الوثوقية.

تناول الجوانب التالية:

- تحسين الوثوقية
- الآثار الاقتصادية ومتطلبات الصيانة

40. اشرح كيف يمكن للتوليد الموزع وتخزين الطاقة تحسين وثوقية نظام التوزيع أثناء انقطاع التيار في خطوط التغذية.

الجزء د — الأسئلة التي تتطلب إجابات مفصلة

41. اشتق واشرح مؤشرات الوثوقية التالية: SAIFI وSAIDI وCAIDI وASAI.

ناقش الدلالة الفيزيائية (أو المعنى العملي) لكل مؤشر، وبيّن أيها يُعد الأنسب لقياس ما يلي:

أ) تكرار الانقطاعات

ب) مدة الانقطاعات

ج) تجربة المشترك (العميل)

د) التوفر العام للخدمة

42. ناقش تقييم وثوقية نظام التوزيع باستخدام نهج "أنماط الفشل" (Failure-mode approach).

اشرح ما يلي:

1. تحديد المكونات
2. تحديد أنماط الفشل
3. تحديد المشتركين المتأثرين
4. إجراءات استعادة الخدمة
5. حساب تكرار الانقطاع
6. حساب مدة الانقطاع
7. حساب مؤشرات الموثوقية

43 . يغذي خط توزيع شعاعي (بجهد 11 كيلوفولت) أربع نقاط حمل كما هو موضح أدناه:

محطة فرعية ← S1 ← LP1 ← S2 ← LP2 ← S3 ← LP3 ← S4 ← LP4

بيانات مكونات الخط هي:

القسم		معدل الأعطال (أعطال/سنة)		زمن الإصلاح (ساعات)
S1	0.08	5
S2		0.06	6
S3	0.05	7
S4	0.04	8

عدد المشتركين عند كل نقطة حمل هو:

نقطة الحمل		عدد المشتركين	الحمل (ميجاوات)
LP1	300	1.0
LP2	250	0.8
LP3	200	0.6
LP4	150	0.5

افترض أن جميع الأعطال مستقلة عن بعضها البعض، وأن تعطل أي قسم من أقسام الخط يؤدي إلى انقطاع الخدمة عن جميع المشتركين الواقعين بعد ذلك القسم (في اتجاه تدفق الطاقة). المطلوب:

أ) تحديد معدل تكرار الأعطال السنوي عند كل نقطة حمل.

ب) تحديد المدة السنوية لانقطاع الخدمة عند كل نقطة حمل.

ج) حساب مؤشر SAIFI للخط بأكمله.

د) حساب مؤشر SAIDI للخط بأكمله.

هـ) حساب مؤشر .CAIDI

و) حساب الطاقة المتوقع عدم توريدها .(EENS

المراجع

المراجع الأجنبية

1. R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd edition, Plenum Press, New York, 1996.
2. J. Endrenyi, Reliability in Electric Power Systems, JohnWiley & Sons, Ltd., Chichester, 1978.
3. T. Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw Hill, New York, 1986.
4. J. J. Burke, Power Distribution Engineering: Fundamentals and Applications, Marcel Dekker, Inc., New York, 1994.
5. R. E. Brown, Electric Power Distribution Reliability, Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
6. G. J. Anders, Probability Concepts in Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
7. R. E. Walpole and R. H. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 3rd edition, Macmillan Publishing Company, New York, 1985.
8. R. Langley, Practical Statistics, revised edition, Dover Publications, Inc., New York, 1970.
9. J. Mandel, The Statistical Analysis of Experimental Data, Dover Publications, Inc., New York,1984.
10. R. E. Barlow and F. Proschan, Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1975.
11. R. Porkess (ed.), The Harper Collins Dictionary of Statistics, Harper Collins Publishers, New York, 1991.
12. D. J. Koosis, Statistics a Self-Teaching Guide, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
13. S. K. Kachigan, Multivariate Statistical Analysis: A Conceptual Introduction, 2nd edition, Radius Press, New York, 1991.
14. R. E. Walpole and R. H. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 3rd edition, Macmillan Publishing Company, New York, 1985.
15. A. M. Breipohl, Probabilistic Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1970.
16. A. W. Drake, Fundamentals of Applied Probability Theory, McGraw-Hill, New York, 1967.

17. A. M. Neville and J. B. Kennedy, Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists, International Textbook Co., Scranton, PA, 1964.
18. Billinton, R., Allan, R. N., 'Power system reliability in perspective', IEEJ. Electronics Power, 30 (1984), pp. 231-6.
19. Lyman, W. J., 'Fundamental consideration in preparing master system plan', Electrical World, 101(24) (1933), pp. 788-92.
20. Smith, S. A., Jr., Spare capacity fixed by probabilities of outage. Electrical World, 103 (1934), pp. 222-5.
21. Benner, P. E., 'The use of theory of probability to determine spare capacity', General Electric Review, 37(7) (1934), pp. 345-8.
22. Dean, S. M., 'Considerations involved in making system investments for improved service reliability', EEJ Bulletin, 6 (1938), pp. 491-96.
23. Billinton, R., 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation', IEEE Transactions, PAS-91 (1972), pp. 649-6CX
24. IEEE Subcommittee Report, 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1971-1977', IEEE Transactions, PAS-97 (1978), pp. 2235-42.
24. Allan, R. N., Biliinton, R., Lee, S. H., 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1977-1982', IEEE Transactions, PAS-103 (1984), pp. 275-82.
25. Allan, R. N., Biliinton, R.. Shahidehpour, S, M., Singh, C, 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1982-1987', IEEE Trans. Power Systems, 3 (I988), pp. 1555-64.
26. Allan, R. N., Biliinton, R., Briepohl, A. M, Grigg, C. H., 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1987-199 \\IEEE Trans. Power Systems, PWRS-9(1)(1994).
27. Biliinton, R., Allan, R. N., Salvaderi. L. (eds.). Applied Reliability Assessment in Electric Power Systems, IE EE Press, New York (1991).
28. Calabrese, G., 'Generating reserve capability determined by the probability method'. ALEE Trans. Power Apparatus Systems, 66 (1947), 1439—50.
29. Watchorn, C. W., 'The determination and allocation of the capacity benefits resulting from interconnecting two or more generating systems', AIEE Trans. Power Apparatus Systems, 69 (1950), pp. 1180-6.
30. Biliinton, R., Li, W., Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, New York (1994).

31. EPRI Report, 'Composite system reliability evaluation: Phase 1—scoping study', Final Report, EPRI EL-5290, Dec. 1987.
32. Sugarman, R., 'New York City's blackout: a S350 million drain', IEEE Spectrum Compendium, Power Failure Analysis and Prevention, 1979, pp. 48-50.
33. Allan, R. N., Biliinton, R., 'Probabilistic methods applied to electric power systems—are they worth it', IEE Power Engineering Journal, **May** (1992), 121-9.
34. CIGRE Working Group 38.03, 'Power System Reliability Analysis—Application Guide, CIGRE Publications, Paris (1988).
35. Mohammed T. Lazim , "Power System Reliability Evaluation" MSc. Dissertation, University of Baghdad, March 1975.
36. Mohammed.T Lazim, and Mahmoud Zeidan.' Reliability evaluation of ring and triple-bus distribution systems - General solution for n- feeder configurations '', Journal of Electrical Power and Energy Systems – Vol.47 pp 78-84, 2013, UK.
37. A. Rei, A. M. Leite da Silva, J. L. Jardim, J. C. O. Mello," Static and Dynamic Aspects in Bulk Power System Reliability Evaluations". IEEE Transactions on Power Systems,2000.
38. J. Endrenyi et al.," Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability". IEEE Transactions on Power Systems,2001.
39. P. Wang, R. Billinton," Reliability Assessment of a Restructured Power System Considering the Reserve Agreements". IEEE Transactions on Power Systems,2004.
40. H. Kim, C. Singh," Reliability Modeling and Simulation in Power Systems With Aging Characteristics". IEEE Transactions on Power Systems,2006.
41. P. Jirutitijaroen, C. Singh," Comparison of Simulation Methods for Power System Reliability Indexes and Their Distributions".
IEEE Transactions on Power Systems ,2008.
42. K. Xie, B. Hu, R. Karki," Tracing the Component Unreliability Contributions and Recognizing the Weak Parts of a Bulk Power System". European Transactions on Electrical Power, Wiley publisher.2001.
43. P. Zhang, W. Li, S. Wang," Reliability-Oriented Distribution Network Reconfiguration Considering Uncertainties of Data by Interval Analysis". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier publisher,2012**.**
44. R. E. Brown, Electric Power Distribution Reliability, Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
45. M. Benidris, S. Elsaiah, J. Mitra," Power System Reliability Evaluation Using a State-Space Classification Technique and Particle Swarm Optimisation Search Method". IET Generation, Transmission & Distribution, IET/Wiley publisher,2015.

46. E. Heylen, M. Ovaere, S. Proost, G. Deconinck, D. Van Hertem," A Multi-Dimensional Analysis of Reliability Criteria: From Deterministic N−1 to a Probabilistic Approach". Electric Power Systems Research, Elsevier publisher,2019.
47. X. Chen, J. Tang, W. Li," Probabilistic Operational Reliability of Composite Power Systems Considering Multiple Meteorological Factors". IEEE Transactions on Power Systems, 2020.
48. N. Nikmehr, P. Zhang," Quantum-Inspired Power System Reliability Assessment". IEEE Transactions on Power Systems,2023.

المعايير الدولية

49. IEC standard **IEC 61078** — Reliability block diagrams (RBDs. to model and calculate the reliability/availability of systems.
50. **IEC** standard **61025** — Fault tree analysis (FTA) , provides guidance for performing **fault tree analysis**, a top-down method for identifying how combinations of component failures can lead to a specified **undesired event**, such as system failure.
51. IEEE 1366-2022 - Distribution-system reliability indices

المراجع العربية

[1]أحمد، أحمد؛ خير بك، طارق؛ سليمان، رهف .**دراسة موثوقية أنظمة الطاقة الكهربائية اعتماداً على مفهوم شبكات بتري وتطبيقها على شبكة التوتر المتوسط لخط بلوران في اللاذقية** .جامعة تشرين، 2015.

[2]**دراسة موثوقية شبكات التوزيع الكهربائية باستخدام التمثيل المباشر والعكسي**، 2002 .دراسة تركز على التقدير الكمي لمعاملات موثوقية تغذية الأحمال في شبكات التوزيع.

[3]نصر، نشأت؛ حمزة، علي؛ صندوق، عباس .**استخدام برمجيات متخصصة في تقويم موثوقية شبكات كهربائية من المنظومة السورية** .جامعة دمشق، 2013/2011.

[4]نصر، نشأت؛ حمزة، علي؛ صندوق، عباس .**تصميم برامج حاسوبية لتقويم موثوقية شبكات التوزيع الكهربائية السورية** .جامعة دمشق.

The Impact of Wind Speed Modeling on the Reliability of Microgrids. [5]
رسالة ماجستير، جامعة الملك فهد للبترول والمعادن. تتضمن ملخصاً باللغة العربية وتبحث تأثير نمذجة سرعة الرياح في مؤشرات موثوقية الشبكات الصغيرة.

[6] **Fault Location in Power Distribution Grids Using Phasor Measurement Units.** رسالة ماجستير، جامعة الملك فهد للبترول والمعادن، وتتضمن ملخصاً باللغة العربية يربط تحديد موقع الأعطال بسرعة استعادة الخدمة وتحسين الاعتمادية.

[7] **الموقع الأمثل للمولدات الموزعة في منظومات التوزيع**. جامعة ديالى، ويتناول تحسين موثوقية منظومة القدرة باستخدام Distributed Generation.

[8] القحطاني، عبدالمحسن بن حسن. **حساسية واستقرار الطاقة المتجددة في الشبكات الكهربائية**. رسالة ماجستير، جامعة الملك خالد، 2025

الملاحق - اسئلة في الوثوقية

الملحق -1 تقييم وثوقية نظام توليد الطاقة الكهربائية

الجزء أ ــــ أسئلة ذات إجابات قصيرة

1. عرّف وثوقية نظام القدرة الكهربائية وميّز بين مفهومي الكفاية (Adequacy) والوثوقية التشغيلية / الأمان (Security).
2. ما هو جدول احتمالية انقطاع قدرة التوليد (COPT)؟
3. عرّف احتمالية فقدان الحمل (LOLP) والقيمة المتوقعة للطاقة المفقودة (LOEE).
4. اشرح أهمية معدل الانقطاع القسري (FOR) في وثوقية نظام التوليد.
5. اشتق النموذج ثنائي الحالة (two-state model) لوحدة التوليد.
6. ما المقصود باحتمالية انقطاع القدرة (COP)؟
7. اشرح مفهوم القدرة المكافئة لتحمّل الحمل (ELCC).
8. عرّف الطاقة المتوقع عدم توفيرها (EENS).
9. ما الفرق بين LOLP و LOLE؟
10. اشرح كيف تؤثر معدلات تعطل وإصلاح وحدات التوليد على وثوقية النظام.
11. ما هو نموذج ماركوف (Markov model) وكيف يُطبّق في دراسة وثوقية نظام التوليد؟
12. اذكر الافتراضات التي تُتخذ عادةً عند إعداد جدول احتمالية انقطاع قدرة التوليد (COPT).
13. اشرح مفهوم الاحتياطي الدوّار (spinning reserve) وعلاقته بالوثوقية.
14. ما المقصود بمعيار الوثوقية الذي ينص على "يوم واحد كل 10 سنوات"؟
15. اشرح أهمية منحنيات مدة الحمل (load duration curves) في تقييم وثوقية نظام التوليد.

الجزء ب — مسائل حسابية

16. نظام توليد مكون من وحدتين

تتكون محطة توليد من وحدتي توليد بقدرة اسمية تبلغ 50 ميجاوات و30 ميجاوات. وتبلغ معدلات الانقطاع القسري (forced outage rates) لكل منهما 0.05 و0.10 على التوالي.

أ) قم بإعداد جدول احتمالات انقطاع القدرة (COPT).

ب) حدد احتمال كل حالة ممكنة من حالات انقطاع القدرة.

ج) إذا كان الحمل الأقصى (peak load) يساوي 70 ميجاوات، فحدد احتمال فقدان الحمل (LOLP) بافتراض وجود حمل ثابت قدره 70 ميجاوات.

17. نظام مكون من ثلاث وحدات

يتكون نظام التوليد من ثلاث وحدات متماثلة، قدرة كل منها 25 ميجاوات، ومعدل انقطاع قسري قدره 0.08.

أ) قم بإعداد جدول احتمالات قدرة التوليد المتاحة (COPT) باستخدام التوزيع ذي الحدين (الطريقة الثنائية).

ب) احسب احتمالية عدم توفر قدرة توليد تبلغ 50 ميجاوات أو أكثر.

ج) إذا كان الحمل الأقصى للنظام يبلغ 60 ميجاوات، فاحسب احتمالية عدم كفاية التوليد.

18. محطة توليد طاقة رباعية الوحدات

تحتوي المحطة على أربع وحدات توليد طاقة بقدرات 20 ميغاواط، و20 ميغاواط، و30 ميغاواط، و40 ميغاواط، وتبلغ نسبة الانقطاع القسري (FORs) 0.05، و0.05، و0.08، و0.10 على التوالي.

أنشئ جدول التحسين الأمثل (COPT) الكامل باستخدام الطريقة التكرارية.

19. حساب مؤشر LOLE

يبلغ إجمالي القدرة المركبة لنظام توليد الطاقة 500 ميجاوات، في حين يبلغ الحمل الأقصى السنوي 450 ميجاوات. باستخدام جدول احتمالات القدرة المتاحة (COPT) المناسب، حدد "توقع فقدان الحمل"

(LOLE) إذا كان احتمال انخفاض قدرة التوليد عن الحمل المطلوب يساوي 0.004 في كل يوم من أيام السنة.

20. منحنى مدة الحمل

يتميز نظام القدرة الكهربائية بمستويات الحمل التالية:

الحمل (ميغاواط)	المدة (ساعة/ سنة)
100	1,000
80	2,000
60	3,000
40	2,760

يتكون نظام التوليد من وحدتين بقدرة 60 ميجاوات لكل منهما، وتبلغ نسبة الانقطاع القسري (FOR) لكل وحدة 0.05.

أ) قم بإنشاء جدول احتمالات سعة النظام (COPT).

ب) حدد مؤشر احتمالية فقدان الحمل (LOLE).

ج) احسب الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS).

الجزء ج ــــ أسئلة تتطلب إجابات مفصلة

21. اشرح بالتفصيل المنهجية المستخدمة لتقييم وثوقية نظام توليد الطاقة الكهربائية، مع توضيح أدوار كل من : معدل الانقطاع القسري (FOR)، وجدول احتمالات انقطاع القدرة (COPT)، وتوقع فقدان الطاقة (LOLE)، واحتمالية فقدان الحمل (LOLP)، والطاقة غير المجهزة المتوقعة (EENS).

22. اشتق الخوارزمية التكرارية (العودية) لبناء جدول احتمالات انقطاع القدرة (COPT)، ووضّح كيفية تطبيقها على نظام توليد مكون من ثلاث وحدات.

23. اشرح نهج "ماركوف" (Markov approach) في تقييم وثوقية نظام التوليد. اشتق احتمالات الانتقال لوحدة توليد ذات حالتين، وناقش كيفية تعميم هذا النهج ليشمل وحدات متعددة.

24. ناقش طريقة "احتمالية فقدان الحمل" (LOLP) لتقييم وثوقية نظام التوليد، واشرح كيفية دمج "منحنى مدة الحمل" (load-duration curve) في عملية الحساب.

25. يحتوي نظام التوليد على عدة وحدات توليد تقليدية ذات قدرات ومعدلات انقطاع قسري (forced outage rates) متفاوتة. ضع إجراءً متكاملاً لحساب كل من مؤشر "توقع فقدان الحمل" (LOLE) ومؤشر "الطاقة غير المجهزة المتوقعة" (EENS) باستخدام جدول احتمالات قدرة النظام المتاحة (COPT) ومنحنى مدة الحمل (load-duration curve).

26. ناقش مزايا ومحددات مؤشرات الوثوقية التالية:

- احتمالية فقدان الحمل (LOLP)
- توقع فقدان الحمل (LOLE)
- الطاقة غير المجهزة المتوقعة (LOEE/EENS)
- تكرارية فقدان الحمل (LOLF)

27. اشرح تأثير إضافة قدرة توليد جديدة على وثوقية النظام. وناقش مفاهيم: هامش الاحتياطي (Reserve margin)، ومساهمة القدرة (Capacity credit)، والقدرة الفعالة لتحمل الحمل (Effective load carrying capability).

28. قارن بين الأساليب الحتمية (Deterministic) والاحتمالية (Probabilistic) لتقييم وثوقية نظام التوليد، مع تقديم أمثلة مناسبة لكل أسلوب.

29. اشرح كيف تؤثر مصادر الطاقة المتجددة - ولا سيما طاقة الرياح والطاقة الشمسية - على تقييم وثوقية أنظمة التوليد التقليدية. وناقش مفهومي "مساهمة القدرة" (Capacity credit) و"النمذجة الاحتمالية" (Probabilistic modelling).

30. تخطط إحدى شركات الكهرباء لإضافة وحدة توليد جديدة بقدرة 100 ميجاوات إلى نظام قائم. اشرح كيف ستقوم بتقييم ما إذا كانت الوحدة الجديدة تلبي معيار الوثوقية المتمثل في أن يكون مؤشر (LOLE) أقل من أو يساوي 0.1 يوم/ سنة، مع وصف الحسابات والافتراضات المطلوبة.

الجزء د ـــ سؤال متقدم

31. مسألة شاملة

يتكون نظام التوليد من الوحدات التالية:

الوحدة	القدرة	معدل الانقطاع القسري
G1	50 ميجاوات	0.04
G2	50 ميجاوات	0.06
G3	100 ميجاوات	0.08
G4	100 ميجاوات	0.10

يمكن تقريب منحنى مدة الحمل السنوي بالقيم التالية:

الحمل (ميجاوات)	ساعة/سنة
250	100
220	500
200	1,000
180	2,000
150	3,000
120	2,160

المطلوب:

أ) إنشاء جدول احتمالات سعة التوليد المتاحة (COPT) الكامل لنظام التوليد.

ب) تحديد احتمالية فقدان الحمل (LOLP) المقابلة لكل مستوى من مستويات الحمل.

ج) حساب التوقع السنوي لفقدان الحمل (LOLE) بوحدة ساعة/سنة.

د) حساب الطاقة المتوقع عدم تزويدها (EENS/LOEE) بوحدة ميجاوات-ساعة/سنة.

هـ) تحديد ما إذا كان النظام يحقق معيار الوثوقية البالغ 0.1 يوم/ سنة.

و) مناقشة كيفية تغير مؤشرات الوثوقية في حال تركيب وحدة إضافية بقدرة 50 ميجاوات ومعدل انقطاع قسري (FOR) يساوي 0.05.

الملحق -2 تقييم وثوقية نظام نقل الطاقة الكهربائية

الجزء أ: أسئلة تتطلب إجابات قصيرة

1. عرّف وثوقية نظام النقل، وميّز بين مفهومي "الكفاية" (Adequacy) و"الأمان" (Security).
2. ما هي المكونات الرئيسية لنموذج وثوقية نظام النقل؟
3. عرّف معدل الفشل ومعدل الإصلاح لخط النقل.
4. اشرح الفرق بين تكوينات الوثوقية على التوالي وعلى التوازي.
5. ما المقصود بانقطاع خط النقل؟
6. عرّف معدل الانقطاع القسري (FOR) واشرح أهميته في وثوقية النقل.
7. ما المقصود بـ "الحالة الطارئة" (Contingency) في نظام نقل الطاقة؟
8. اشرح معنى معيار الوثوقية (N−1).
9. ما هي الحالة الطارئة من النوع (N−2)؟
10. عرّف احتمالية فقدان الحمل (LOLP) في سياق شبكة النقل.
11. ما المقصود بالطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS)؟
12. اشرح مفهوم الفشل الناجم عن سبب مشترك (Common-cause failure) في أنظمة النقل.
13. ما هي مجموعة القطع الدنيا (Minimal cut set)؟
14. اشرح استخدام نماذج ماركوف (Markov models) في تقييم وثوقية نظام النقل.
15. ما الغرض من دراسة تدفق الحمل (Load-flow study) في تقييم وثوقية النقل؟
16. اشرح العلاقة بين الحدود الحرارية وحدود الجهد ووثوقية النقل.
17. ما المقصود بحالات النظام في التحليل الاحتمالي لوثوقية النقل؟

18. عرّف مفهومي التوافرية (Availability) وعدم التوافرية (Unavailability) لمكون من مكونات النقل.

19. ما هو مؤشر الوثوقية؟ واذكر ثلاثة أمثلة تُستخدم لأنظمة النقل.

20. اشرح سبب تأثير الظروف الجوية على وثوقية نظام النقل.

الجزء ب: أسئلة وصفية/ نظرية

21. اشرح الإجراء الأساسي لتقييم وثوقية نظام نقل اقدرة الكهربائية.

يجب أن تتضمن إجابتك ما يلي:

- تمثيل النظام
- بيانات وثوقية المكونات
- حصر حالات الطوارئ (الاحتمالات الطارئة)
- تحليل تدفق الحمل (سريان القدرة)
- تحديد حالات فشل النظام
- مؤشرات الوثوقية
- تفسير النتائج

22. ناقش معيار "N−1" المتعلق بوثوقية نظام النقل.

اشرح ما يلي:

- مفهوم المعيار
- تطبيقه على خطوط النقل والمحولات
- مزاياه
- حدوده (أوجه القصور فيه)
- الحالات التي قد لا يكون فيها معيار "N−1" كافياً

23. اشرح النهج الاحتمالي لتقييم وثوقية نظام النقل.

ناقش كيفية دمج احتمالات تعطل المكونات مع حالات تشغيل الشبكة لتحديد وثوقية النظام.

24. صِف دور تحليل تدفق الأحمال في تقييم وثوقية نظام النقل.

اشرح كيف يمكن أن يؤدي انقطاع خط النقل إلى:

- تحميل زائد على الخط
- تجاوز حدود الفولتية المسموح بها
- انقطاع التغذية
- انفصال الشبكة
- أعطال متسلسلة (متتابعة)

25. اشرح مفهوم تحليل الحالات الطارئة (contingency analysis) وتطبيقه في تقييم وثوقية شبكات النقل.

قارن بين:

- تحليل الحالة الأساسية (Base-case analysis)
- انقطاع خط واحد
- خروج مولد عن الخدمة
- خروج محول عن الخدمة
- تحليل الحالات الطارئة المتعددة

26. ناقش طريقة "مجموعة القطع الصغرى " (Minimal-cut-set method) لتقييم وثوقية أنظمة النقل. اشرح كيفية تحديد مجموعات القطع الصغرى وكيفية استخدامها لحساب احتمالية فشل النظام.

27. قارن بين الطرق الحتمية (Deterministic) والطرق الاحتمالية (Probabilistic) لتقييم وثوقية شبكات النقل. ناقش مزايا وعيوب كل طريقة.

28. اشرح كيف يمكن استخدام محاكاة "مونت كارلو" لتقييم موثوقية نظام النقل. يجب أن يتضمن الشرح ما يلي:

1. التوليد العشوائي لحالات المكونات
2. تشكيل حالة الشبكة
3. حل مسألة تدفق الحمل (Load-flow solution)
4. تحديد حالات الفشل
5. التقدير الإحصائي لمؤشرات الموثوقية.

الجزء ج: أسئلة اختبارية ذات طابع عددي

29. نظام نقل ثنائي الخطوط يقوم تغذية حمل كهربائي عبر خطي نقل متصلين على التوازي. يبلغ معدل الانقطاع القسري السنوي لكل خط 0.05.

أ) حدد احتمال أن يكون كلا الخطين متاحين للعمل.

ب) حدد احتمال أن يكون خط واحد فقط غير متاح للعمل.

ج) حدد احتمال أن يكون كلا الخطين غير متاحين للعمل.

د) احسب مدى توافر (جاهزية) نظام النقل.

30. نظام نقل على التوالي

تتصل ثلاثة خطوط نقل على التوالي بين محطة توليد ومركز أحمال. وتبلغ احتمالات تعطلها السنوية 0.02 و0.03 و0.04 على التوالي.

بافتراض استقلالية حالات التعطل:

أ) احسب احتمال أن تكون الخطوط الثلاثة جميعها متاحة للعمل.

ب) احسب احتمال تعطل مسار النقل.

ج) حدد وثوقية النظام.

31. شبكة نقل مكونة من أربعة خطوط

تتكون شبكة نقل من أربعة خطوط ذات احتمالات الفشل التالية:

الخط	احتمال الفشل
L1	0.02
L2	0.03
L3	0.04
L4	0.05

بافتراض أن حالات الانقطاع مستقلة عن بعضها البعض:

أ) حدد احتمال عدم حدوث أي انقطاع.

ب) حدد احتمال حدوث انقطاع واحد بالضبط.

ج) حدد احتمال حدوث انقطاعين أو أكثر في آن واحد.

32. وثوقية خط النقل

يبلغ معدل الأعطال لخط نقل فولتية 132 كيلوفولت 0.08 عطل/ سنة، ومتوسط زمن الإصلاح 12 ساعة. احسب:

أ) متوسط المدة السنوية لانقطاع الخدمة.

ب) توافرية الخط.

ج) عدم توافرية الخط.

د) العدد المتوقع لساعات عدم توافر الخط في السنة.

33. تحليل الطوارئ وفق معيار (N−1)

يتكون نظام النقل من خمسة خطوط. وفي ظل ظروف التشغيل العادية، يعمل النظام ضمن جميع الحدود الحرارية المسموح بها. تم الحصول على النتائج التالية من تحليل الطوارئ:

حالة الانقطاع	أقصى حمل على الخط	الحمل المُغذّى
انقطاع الخط L1	%115	%100
انقطاع الخط L2	%92	%100
انقطاع الخط L3	%105	%98
انقطاع الخط L4	%88	%100
انقطاع الخط L5	%96	%100

أ) حدد حالات الطوارئ التي تخالف معيار (N–1).

ب) حدد حالة الطوارئ التي تتسبب في أكبر قدر من فقدان الحمل.

ج) اشرح الإجراءات التصحيحية الممكنة.

الجزء د: مسائل عددية متقدمة

34. مسألة وثوقية النقل في نظام مكون من ثلاث قضبان توزيع (Buses)

لننظر في نظام مكون من ثلاثة قضبان توزيع يتألف من:

- قضيب توزيع 1: مولد = 100 ميجاوات
- قضيب توزيع 2: حمل = 60 ميجاوات
- قضيب توزيع 3: حمل = 40 ميجاوات

تتصل قضبان التوزيع هذه عبر ثلاثة خطوط نقل:

الخط	من–إلى	السعة	معدل الانقطاع القسري (FOR)
L1	2–1	80 ميجاوات	0.05
L2	3–1	60 ميجاوات	0.04
L3	3–2	40 ميجاوات	0.03

افترض أن أعطال الخطوط مستقلة عن بعضها البعض. المطلوب:

أ) حصر جميع حالات انقطاع خط واحد.

ب) تحديد سعة النقل المتاحة لكل حالة.

ج) تحديد الحالات التي لا يمكن فيها تلبية الحمل بالكامل.

د) حساب احتمالية حدوث كل حالة.

هـ) تحديد احتمالية فشل نظام النقل.

35. حساب مؤشر الوثوقية

يتم تقييم نظام نقل للطاقة على مدار عام واحد، حيث تحدث حالات الانقطاع التالية:

الحدث Event	التكرارية (حدث/ سنة) Frequency (events/year)	المدة (ساعة/ حدث) Duration (hours/event)	الحمل المفصول (ميجاواط) Load interrupted (MW)
عطل الخط L1	0.20	5	20
عطل الخط L2	0.10	8	30
عطل المحوّل	0.05	20	50

احسب ما يلي:

أ) إجمالي تكرارية الانقطاع.

ب) إجمالي مدة الانقطاع.

ج) الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS).

د) متوسط مدة الانقطاع.

هـ) ناقش أداء النظام من حيث الوثوقية.

36. مسألة مجموعة القطع الدنيا (Minimal cut-set problem)

يمكن لمركز الأحمال استقبال الطاقة عبر ثلاثة مسارات للنقل:

- المسار A: L1–L2
- المسار B: L3–L4
- المسار C: L5

بافتراض أن الخطوط تتعطل بشكل مستقل باحتمالات قدرها:

- L1 = 0.02
- L2 = 0.03
- L3 = 0.04
- L4 = 0.05
- L5 = 0.01

أ) حدد مجموعات القطع الصغرى (الدنيا).

ب) حدد احتمال تعطل كل مسار من مسارات النقل.

ج) حدد احتمال فقدان مركز الأحمال لجميع مصادر إمداد الطاقة عبر مسارات النقل.

د) اذكر الافتراضات المستخدمة في حساباتك.

الملحق-3 تقييم وثوقية نظام توزيع الكهرباء

الجزء أ — أسئلة تتطلب إجابات موجزة

1. عرّف وثوقية نظام التوزيع.
2. ميّز بين كفاية نظام التوزيع وأمن النظام.
3. ما هي الأسباب الرئيسية للأعطال في أنظمة توزيع الكهرباء؟
4. عرّف معدل الفشل (العطل) ومعدل الإصلاح.

5. ما المقصود بـ "توافرية المكون" (component availability)؟

6. عرّف مؤشر متوسط تكرار انقطاع الخدمة في النظام (SAIFI).

7. عرّف مؤشر متوسط مدة انقطاع الخدمة في النظام (SAIDI).

8. عرّف مؤشر متوسط مدة انقطاع الخدمة للمشترك (CAIDI).

9. ما هو مؤشر متوسط توافرية الخدمة (ASAI)؟

10. اشرح الفرق بين الانقطاعات اللحظية والانقطاعات المستمرة.

11. ما هو نظام التوزيع الشعاعي (Radial Distribution System)؟

12. اشرح خصائص الوثوقية لمغذّي توزيع شعاعي.

13. ما هو نظام التوزيع الشبكي (Meshed Distribution System)؟

14. اشرح مفهوم مفتاح الربط (tie switch) في سياق وثوقية نظام التوزيع.

15. ما المقصود بتقسيم مغذّي التوزيع إلى قطاعات (sectionalizing)؟

16. عرّف الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS).

17. اشرح مفهوم تكلفة انقطاع الخدمة بالنسبة للمشترك.

18. ما هي "مجموعة القطع الصغرى (الدنيا) " (minimal cut set) في شبكة التوزيع؟

19. اشرح الفرق بين مؤشرات الوثوقية عند نقطة الحمل ومؤشرات الوثوقية للنظام ككل.

20. ما الغرض من تركيب أجهزة إعادة الإغلاق الآلي (automatic reclosers) في نظام التوزيع؟

الجزء ب ــــ أسئلة نظرية ووصفية

21. اشرح الإجراء الأساسي لتقييم وثوقية نظام توزيع الطاقة الكهربائية.

ناقش ما يلي:

- هيكلية نظام التوزيع
- معدلات تعطل المكونات
- أوقات الإصلاح

- نقاط الأحمال
- أنماط الأعطال
- إجراءات استعادة الخدمة
- مؤشرات الوثوقية

22. اشرح كيفية تقييم الوثوقية في نظام توزيع شعاعي (Radial Distribution System).

ناقش تأثير تعطل أي مكوّن من مكوّنات خط التغذية على المشتركين الواقعين بعد نقطة العطل (المشتركين في المراحل اللاحقة).

23. قارن بين أنظمة التوزيع الشعاعية (Radial)، والحلقية (Ring)، والشبكية (Meshed) من حيث الوثوقية. يجب أن تتناول إجابتك الجوانب التالية:

- استمرارية التغذية
- مسارات التغذية البديلة
- الحماية
- زمن استعادة الخدمة
- التكلفة
- مؤشرات الموثوقية

24. اشرح مؤشرات الوثوقية التالية لأنظمة التوزيع:

- SAIFI
- SAIDI
- CAIDI
- ASAI
- EENS

وضّح المعنى الفيزيائي لكل مؤشر وكيفية حسابه.

25. اشرح تأثير مفاتيح التقسيم (Sectionalizing switches) على وثوقية نظام التوزيع.

ناقش كيف يمكن لعملية التقسيم أن تقلل من:

- عدد المشتركين المتأثرين
- مدة الانقطاع
- الطاقة غير المجهزة (المفقودة)

26. اشرح دور أجهزة إعادة الإغلاق الآلي (Automatic reclosers) في تحسين وثوقية نظام التوزيع.

ناقش الأعطال المؤقتة، والأعطال الدائمة، وتنسيق الحماية، ومدة الانقطاع.

27. صِف طريقة "مجموعة القطع الصغرى (الدنيا) " (Minimal-cut-set method) لتقييم وثوقية نظام التوزيع.

اشرح كيفية تحديد مجموعات القطع الدنيا في مغذٍ شعاعي (Radial feeder).

28. ناقش تأثير التوليد الموزع (DG) على وثوقية نظام التوزيع. مع مراعاة الجوانب التالية:

- التشغيل المستقل (الجزرية/Islanding)
- مصدر التغذية البديل
- تنسيق الحماية
- المساهمة في تيار العطل
- استعادة الخدمة
- الشبكات المصغرة (Microgrids)

الجزء ج — أسئلة حسابية

29. وثوقية مغذٍ كهربائي أحادي يُغذّي خط توزيع شعاعي (Radial feeder) مئة مشترك. يتكون الخط من ثلاثة أقسام بالبيانات التالية:

القسم	معدل الأعطال (أعطال/سنة)	زمن الإصلاح (ساعات)
1	0.10	5
2	0.08	6
3	0.05	4

افترض أن تعطل أي قسم يؤدي إلى انقطاع الخدمة عن جميع المشتركين الواقعين بعد ذلك القسم (في اتجاه التغذية). احسب:

أ) التكرار السنوي للانقطاع لكل نقطة حمل.

ب) المدة السنوية لانقطاع الخدمة لكل نقطة حمل.

ج) متوسط مدة الانقطاع لكل نقطة حمل.

30. حساب مؤشري SAIFI و SAIDI

تقوم شركة لتوزيع الكهرباء بتزويد 1000 مشترك بالخدمة. وخلال عام واحد، حدثت حالات انقطاع التيار التالية:

الحدث	عدد المشتركين المتأثرين	مدة الانقطاع
العطل 1	200	ساعتان
العطل 2	500	ساعة واحدة
العطل 3	100	4 ساعات
العطل 4	300	3 ساعات

احسب ما يلي:

أ) SAIFI

ب) SAIDI

ج) CAIDI

31. وثوقية مغذي التوزيع

يُغذي مغذي شعاعي ثلاث نقاط حمل. بيانات الوثوقية هي كالتالي:

المكون	معدل الفشل (أعطال/ سنة)	زمن الإصلاح (ساعات)
قسم المغذي A	0.08	5
قسم المغذي B	0.06	6
قسم المغذي C	0.04	8

تم ترتيب نقاط الحمل على النحو التالي:

محطة التوزيع الفرعية ← C ← B ← A

حدد تكرار الانقطاع ومدة الانقطاع السنوية لكل نقطة حمل.

32. الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS): يحتوي مغذي توزيع على ثلاث نقاط أحمال:

نقطة الحمل	الحمل	معدل الأعطال	زمن الإصلاح
LP1	2 ميجاوات	0.05/سنة	5 ساعات
LP2	3 ميجاوات	0.04/سنة	6 ساعات
LP3	1.5 ميجاوات	0.03/سنة	8 ساعات

بافتراض أن الأعطال مستقلة عن بعضها البعض، احسب الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS) بوحدة ميجاوات-ساعة/سنة.

33. تكلفة انقطاع الخدمة عن المشتركين

يضم نظام التوزيع مجموعات المشتركين التالية:

نوع المشترك	عدد المشتركين	متوسط تكلفة الانقطاع
سكني	500	6 دولار / مشترك-ساعة
تجاري	100	30 دولار/ مشترك-ساعة
صناعي	20	150 دولار / مشترك-ساعة

إذا أدى عطل في المغذي إلى انقطاع الخدمة عن جميع المشتركين لمدة ساعتين، فاحسب ما يلي:

أ) إجمالي تكلفة انقطاع الخدمة عن المشتركين.

ب) متوسط تكلفة الانقطاع لكل مشترك.

ج) ناقش كيف يمكن تبرير الاستثمار في تحسين الموثوقية باستخدام تحليل تكلفة الانقطاع.

الجزء د ـــ مسائل عددية متقدمة

34. وثوقية نظام التوزيع الشعاعي

لننظر في خط التغذية الشعاعي التالي:

محطة ثانوية ← القسم 1 ← القسم 2 ← القسم 3 ← القسم 4

يغذي هذا الخط أربع نقاط أحمال:

- LP1 بعد القسم 1
- LP2 بعد القسم 2
- LP3 بعد القسم 3
- LP4 بعد القسم 4

بيانات المكونات هي كالتالي:

القسم	معدل الأعطال/ سنة	زمن الإصلاح
S1	0.06	4 ساعات
S2	0.08	5 ساعات
S3	0.05	6 ساعات
S4	0.04	8 ساعات

احسب لكل نقطة حمل ما يلي:

أ) تكرارية الأعطال.

ب) المدة السنوية لانقطاع الخدمة.

ج) متوسط مدة انقطاع الخدمة.

د) SAIFI.

هـ) SAIDI.

و) CAIDI.

35. تأثير استخدام مفاتيح التقسيم (Sectionalizing)

يغذي خط تغذية شعاعي (radial feeder) أربع نقاط أحمال. في البداية، لا يوجد مفتاح تقسيم.

يتم تركيب مفتاح تقسيم بين نقطتي الحمل LP2 و LP3.

معدلات تعطل مكونات خط التغذية هي كالتالي:

المكون	معدل التعطل/ سنة	زمن الإصلاح- ساعة
S1	| 0.10	6
S2	0.08	5
S3	0.06	8

افترض أن المفتاح قادر على عزل القسم الذي حدث فيه العطل وإعادة التغذية للمشتركين غير المتأثرين (الواقعين بعد نقطة العطل) في غضون ساعة واحدة. المطلوب:

أ) حساب مؤشرات الوثوقية قبل تركيب المفتاح.

ب) حساب المؤشرات بعد تركيب المفتاح.

ج) تحديد نسبة التحسن في مؤشر SAIDI.

د) شرح سبب تحسين عملية التقسيم للموثوقية.

36. نظام التوزيع الحلقي

تتكون شبكة التوزيع من أربع نقاط حمل متصلة على شكل حلقة:

$$S \rightarrow LP1 \rightarrow LP2 \rightarrow LP3 \rightarrow LP4 \rightarrow S$$

يبلغ معدل الأعطال لكل قسم من أقسام الخط 0.05 عطل/ سنة، وزمن الإصلاح 5 ساعات.

افترض أنه يمكن تشغيل الحلقة كشبكة شعاعية (Radial network) وأنه يمكن استعادة التغذية عبر المسار البديل بعد عزل العطل.

احسب ما يلي:

أ) وثوقية كل نقطة حمل دون استخدام التبديل (Switching).

ب) المدة المتوقعة لانقطاع الخدمة مع وجود نظام تبديل آلي.

ج) ناقش التحسن في الوثوقية مقارنةً بالنظام الشعاعي البحت.

الملحق-4 اسئلة حول طرق تحسين الوثوقية

الجزء هـ - أسئلة حول تحسين الوثوقية

37. يعاني مغذٍّ شعاعي للتوزيع الكهربائي من انقطاعات متكررة.

ناقش خمس طرق عملية لتحسين موثوقيته.

يمكن أن تتضمن إجابتك ما يلي:

- التقسيم (إلى قطاعات)
- أجهزة إعادة الإغلاق الآلي
- المغذيات البديلة
- التوليد الموزع
- الصيانة الوقائية
- الكيبلات الأرضية
- المفاتيح التي يتم التحكم فيها عن بُعد
- المحولات الاحتياطية

38. اشرح كيف يمكن للأتمتة وتقنية الشبكات الذكية تحسين وثوقية نظام التوزيع.

ناقش ما يلي:

- نظام سكادا (SCADA)

- الكشف الآلي عن الأعطال
- تحديد موقع العطل
- العزل
- استعادة الخدمة
- التبديل عن بُعد
- الشبكات ذاتية الإصلاح

39. ناقش تأثير تحويل خطوط التوزيع الهوائية إلى خطوط أرضية (تحت الأرض) على الوثوقية.

تناول الجوانب التالية:

- تحسين الوثوقية
- الآثار الاقتصادية ومتطلبات الصيانة

40. اشرح كيف يمكن للتوليد الموزع وتخزين الطاقة تحسين وثوقية نظام التوزيع أثناء انقطاع التيار في خطوط التغذية.

الجزء د ـــ الأسئلة التي تتطلب إجابات مفصلة

41. اشتق واشرح مؤشرات الوثوقية التالية: SAIFI وSAIDI وCAIDI وASAI.

ناقش الدلالة الفيزيائية (أو المعنى العملي) لكل مؤشر، وبيّن أيها يُعد الأنسب لقياس ما يلي:

أ) تكرار الانقطاعات

ب) مدة الانقطاعات

ج) تجربة المشترك (العميل)

د) التوفر العام للخدمة

42. ناقش تقييم وثوقية نظام التوزيع باستخدام نهج "أنماط الفشل" (Failure-mode approach).

اشرح ما يلي:

1. تحديد المكونات

2. تحديد أنماط الفشل

3. تحديد المشتركين المتأثرين

4. إجراءات استعادة الخدمة

5. حساب تكرار الانقطاع

6. حساب مدة الانقطاع

7. حساب مؤشرات الموثوقية

43 . يغذي خط توزيع شعاعي (بجهد 11 كيلوفولت) أربع نقاط حمل كما هو موضح أدناه:

محطة فرعية ← S1 ← LP1 ← S2 ← LP2 ← S3 ← LP3 ← S4 ← LP4

بيانات مكونات الخط هي:

القسم		معدل الأعطال (أعطال/سنة)		زمن الإصلاح (ساعات)
S1	0.08	5
S2		0.06	6
S3	0.05	7
S4	0.04	8

عدد المشتركين عند كل نقطة حمل هو:

نقطة الحمل		عدد المشتركين	الحمل (ميجاوات)
LP1	300	1.0
LP2	250	0.8
LP3	200	0.6
LP4	150	0.5

افترض أن جميع الأعطال مستقلة عن بعضها البعض، وأن تعطل أي قسم من أقسام الخط يؤدي إلى انقطاع الخدمة عن جميع المشتركين الواقعين بعد ذلك القسم (في اتجاه تدفق الطاقة). المطلوب:

أ) تحديد معدل تكرار الأعطال السنوي عند كل نقطة حمل.

ب) تحديد المدة السنوية لانقطاع الخدمة عند كل نقطة حمل.

ج) حساب مؤشر SAIFI للخط بأكمله.

د) حساب مؤشر SAIDI للخط بأكمله.

هـ) حساب مؤشر CAIDI.

و) حساب الطاقة المتوقع عدم توريدها (EENS).

ز) اقتراح ثلاثة تدابير يمكن استخدامها لتحسين وثوقية الخط.

المراجع

المراجع الأجنبية

1. R. Billinton and R. N. Allan, “Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd edition, Plenum Press, New York, 1996.
2. J. Endrenyi, Reliability in Electric Power Systems, JohnWiley & Sons, Ltd., Chichester, 1978.
3. T. Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw Hill, New York, 1986.
4. J. J. Burke, Power Distribution Engineering: Fundamentals and Applications, Marcel Dekker, Inc., New York, 1994.
5. R. E. Brown, Electric Power Distribution Reliability, Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
6. G. J. Anders, Probability Concepts in Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
7. R. E. Walpole and R. H. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 3rd edition, Macmillan Publishing Company, New York, 1985.
8. R. Langley, Practical Statistics, revised edition, Dover Publications, Inc., New York, 1970.
9. J. Mandel, The Statistical Analysis of Experimental Data, Dover Publications, Inc., New York,1984.
10. R. E. Barlow and F. Proschan, Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1975.
11. R. Porkess (ed.), The Harper Collins Dictionary of Statistics, Harper Collins Publishers, New York, 1991.
12. D. J. Koosis, Statistics a Self-Teaching Guide, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
13. S. K. Kachigan, Multivariate Statistical Analysis: A Conceptual Introduction, 2nd edition, Radius Press, New York, 1991.
14. R. E. Walpole and R. H. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 3rd edition, Macmillan Publishing Company, New York, 1985.
15. A. M. Breipohl, Probabilistic Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1970.
16. A. W. Drake, Fundamentals of Applied Probability Theory, McGraw-Hill, New York, 1967.
17. A. M. Neville and J. B. Kennedy, Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists, International Textbook Co., Scranton, PA, 1964.
18. Billinton, R., Allan, R. N., 'Power system reliability in perspective', IEEJ.

Electronics Power, 30 (1984), pp. 231-6.
19. Lyman, W. J., 'Fundamental consideration in preparing master system plan', Electrical World, 101(24) (1933), pp. 788-92.
20. Smith, S. A., Jr., Spare capacity fixed by probabilities of outage. Electrical World, 103 (1934), pp. 222-5.
21. Benner, P. E., 'The use of theory of probability to determine spare capacity', General Electric Review, 37(7) (1934), pp. 345-8.
22. Dean, S. M., 'Considerations involved in making system investments for improved service reliability', EEJ Bulletin, 6 (1938), pp. 491-96.
23. Billinton, R., 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation', IEEE Transactions, PAS-91 (1972), pp. 649-6CX
24. IEEE Subcommittee Report, 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1971-1977', IEEE Transactions, PAS-97 (1978), pp. 2235-42.
24. Allan, R. N., Biliinton, R., Lee, S. H., 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1977-1982', IEEE Transactions, PAS-103 (1984), pp. 275-82.
25. Allan, R. N., Biliinton, R.. Shahidehpour, S, M., Singh, C, 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1982-1987', IEEE Trans. Power Systems, 3 (I988), pp. 1555-64.
26. Allan, R. N., Biliinton, R., Briepohl, A. M, Grigg, C. H., 'Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1987-199 \\IEEE Trans. Power Systems, PWRS-9(1)(1994).
27. Biliinton, R., Allan, R. N., Salvaderi. L. (eds.). Applied Reliability Assessment in Electric Power Systems, IE EE Press, New York (1991).
28. Calabrese, G., 'Generating reserve capability determined by the probability method'. ALEE Trans. Power Apparatus Systems, 66 (1947), 1439—50.
29. Watchorn, C. W., 'The determination and allocation of the capacity benefits resulting from interconnecting two or more generating systems', AIEE Trans. Power Apparatus Systems, 69 (1950), pp. 1180-6.
30. Biliinton, R., Li, W., Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, New York (1994).
31. EPRI Report, 'Composite system reliability evaluation: Phase 1—scoping study', Final Report, EPRI EL-5290, Dec. 1987.

32. Sugarman, R., 'New York City's blackout: a S350 million drain', IEEE Spectrum Compendium, Power Failure Analysis and Prevention, 1979, pp. 48-50.
33. Allan, R. N., Biliinton, R., 'Probabilistic methods applied to electric power systems—are they worth it', IEE Power Engineering Journal, **May** (1992), 121-9.
34. CIGRE Working Group 38.03, 'Power System Reliability Analysis—Application Guide, CIGRE Publications, Paris (1988).
35. Mohammed T. Lazim , "Power System Reliability Evaluation" MSc. Dissertation, University of Baghdad, March 1975.
36. Mohammed.T Lazim, and Mahmoud Zeidan.' Reliability evaluation of ring and triple-bus distribution systems - General solution for n- feeder configurations '', Journal of Electrical Power and Energy Systems – Vol.47 pp 78-84, 2013, UK.
37. A. Rei, A. M. Leite da Silva, J. L. Jardim, J. C. O. Mello," Static and Dynamic Aspects in Bulk Power System Reliability Evaluations". IEEE Transactions on Power Systems,2000.
38. J. Endrenyi et al.," Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability". IEEE Transactions on Power Systems,2001.
39. P. Wang, R. Billinton," Reliability Assessment of a Restructured Power System Considering the Reserve Agreements". IEEE Transactions on Power Systems,2004.
40. H. Kim, C. Singh," Reliability Modeling and Simulation in Power Systems With Aging Characteristics". IEEE Transactions on Power Systems,2006.
41. P. Jirutitijaroen, C. Singh," Comparison of Simulation Methods for Power System Reliability Indexes and Their Distributions".
IEEE Transactions on Power Systems ,2008.
42. K. Xie, B. Hu, R. Karki," Tracing the Component Unreliability Contributions and Recognizing the Weak Parts of a Bulk Power System". European Transactions on Electrical Power, Wiley publisher.2001.
43. P. Zhang, W. Li, S. Wang," Reliability-Oriented Distribution Network Reconfiguration Considering Uncertainties of Data by Interval Analysis". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier publisher,2012.
44. R. E. Brown, Electric Power Distribution Reliability, Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
45. M. Benidris, S. Elsaiah, J. Mitra," Power System Reliability Evaluation Using a State-Space Classification Technique and Particle Swarm Optimisation Search Method". IET Generation, Transmission & Distribution, IET/Wiley publisher,2015.

46. E. Heylen, M. Ovaere, S. Proost, G. Deconinck, D. Van Hertem," A Multi-Dimensional Analysis of Reliability Criteria: From Deterministic N−1 to a

Probabilistic Approach”. Electric Power Systems Research, Elsevier publisher,2019.
47. X. Chen, J. Tang, W. Li,” Probabilistic Operational Reliability of Composite Power Systems Considering Multiple Meteorological Factors”. IEEE Transactions on Power Systems, 2020.
48. N. Nikmehr, P. Zhang,” Quantum-Inspired Power System Reliability Assessment”. IEEE Transactions on Power Systems,2023.

المعايير الدولية

49. IEC standard **IEC 61078** — Reliability block diagrams (RBDs. to model and calculate the reliability/availability of systems.
50. **IEC** standard **61025** — Fault tree analysis (FTA) , provides guidance for performing **fault tree analysis**, a top-down method for identifying how combinations of component failures can lead to a specified **undesired event**, such as system failure.
51. IEEE 1366-2022 - Distribution-system reliability indices

المراجع العربية

[1]أحمد، أحمد؛ خير بك، طارق؛ سليمان، رهف .**دراسة موثوقية أنظمة الطاقة الكهربائية اعتماداً على مفهوم شبكات بتري وتطبيقها على شبكة التوتر المتوسط لخط بلوران في اللاذقية** .جامعة تشرين، 2015.

[2]**دراسة موثوقية شبكات التوزيع الكهربائية باستخدام التمثيل المباشر والعكسي**، 2002 .دراسة تركز على التقدير الكمي لمعاملات موثوقية تغذية الأحمال في شبكات التوزيع.

[3]نصر، نشأت؛ حمزة، علي؛ صندوق، عباس .**استخدام برمجيات متخصصة في تقويم موثوقية شبكات كهربائية من المنظومة السورية** .جامعة دمشق، 2011/2013.

[4]نصر، نشأت؛ حمزة، علي؛ صندوق، عباس .**تصميم برامج حاسوبية لتقويم موثوقية شبكات التوزيع الكهربائية السورية** .جامعة دمشق.

The Impact of Wind Speed Modeling on the Reliability of Microgrids. [5]
رسالة ماجستير، جامعة الملك فهد للبترول والمعادن. تتضمن ملخصاً باللغة العربية وتبحث تأثير نمذجة سرعة الرياح في مؤشرات موثوقية الشبكات الصغيرة.

[6] **Fault Location in Power Distribution Grids Using Phasor Measurement Units**. رسالة ماجستير، جامعة الملك فهد للبترول والمعادن، وتتضمن ملخصاً باللغة العربية يربط تحديد موقع الأعطال بسرعة استعادة الخدمة وتحسين الاعتمادية.

[7] **الموقع الأمثل للمولدات الموزعة في منظومات التوزيع**. جامعة ديالى، ويتناول تحسين موثوقية منظومة القدرة باستخدام Distributed Generation.

[8] القحطاني، عبدالمحسن بن حسن. **حساسية واستقرار الطاقة المتجددة في الشبكات الكهربائية**. رسالة ماجستير، جامعة الملك خالد، 2025